

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Koordinace izolace v sítích vysokého napětí
Insulation Coordination in Medium Voltage Networks

Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Kučík**

Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**

Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**

Téma: **Koordinace izolace v sítích vysokého napětí
Insulation Coordination in Medium Voltage Networks**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Popis změn, které přináší nová verze ČSN EN IEC 60071-2 ed. 2
Spínací přepětí
Zpětný přeskok

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 60071-2 Elektrotechnické předpisy - Koordinace izolace: Část 2: Pravidla pro použití, 1st ed. Praha: Český normalizační institut, 2000.

ČSN EN IEC 60071-2 ed. 2 Koordinace izolace: Část 2: Směrnice pro použití, 2nd ed. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

ČSN EN 60071-1 ed. 2 Koordinace izolace: Část 1: Definice, principy a pravidla, 2nd ed. Praha: Český normalizační institut, 2006.

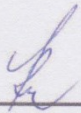
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

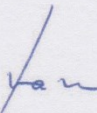
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2020



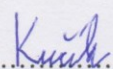

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne.....15.5.2020.....

..........

podpis studenta

Poděkování

Touto formou bych rád poděkovat Ing. Tadeuszovi Sikorovi PhD. za konzultace, připomínky a vedení během vypracování méj bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou nežádoucích jevů spjatých se sítěmi vysokého napětí. Skládá se ze tří hlavních částí, kterými jsou koordinace izolace v sítích vysokého napětí, spínací přepětí a zpětný přeskok. V první části nalezneme rozbor změn, které přináší nová verze normy ČSN EN IEC 60071-2 ed 2, jenž definuje problematiku koordinace izolace v sítích vysokého napětí. Druhá část práce se soustředí na fenomén spínacího přepětí. Dozvíme se zde o obecných informacích tohoto druhu přepětí, jako je vznik, vlivy parametrů, způsoby a metody pro jeho omezení, ale i informace o přechodném spínacím přepětí, jenž je úzce spjato s touto problematikou. Poslední část, se zabývá jevem zpětného přeskoku. Opět jsou popsány obecné informace o vzniku, vlivy různých parametrů, metody omezení výskytu, porovnání způsoby ochrany atd.

Klíčová slova

koordinace izolace; vysoké napětí; spínací přepětí; zpětný přeskok; svodič přepětí; přechodné spínací přepětí

Abstract

This bachelor thesis deals with problems with unwanted phenomena in medium voltage networks. It consist of three main parts, which are insulation coordination in medium voltage networks, switching overvoltage and back flashover. In the first part we can find an analysis of changes of the new version of the standard ČSN EN IEC 60071-2 ed 2, which defines problematics of insulation coordination in medium voltage networks. The second part of the thesis focuses on the phenomenon switching overvoltage. There we can come to know about general information about this type of overvoltage, such as effects of parameters, ways and methods for reduction, as well as information about transient switching overvoltage, which is closely related with part. The last part deals with the phenomenon back flashover. Again, there are described general information about creation, influences of parameters, methods of restriction, protection etc.

Key words

insulation coordination; medium voltage; switching overvoltage; back flashover; surge arrester; transient recovery voltage

Obsah

1	Úvod	1
2	Popis změn, které přináší nová verze ČSN EN IEC 60071-2 ed 2.....	2
2.1	Svodiče přepětí.....	2
2.2	Reprezentativní napětí a přepětí	3
2.3	Přepětí s velmi rychlým čelem VFFO a jeho koordinace v UHV	4
2.4	Atmosférická korekce – korekce pro nadmořskou výšku	5
2.5	Způsob hodnocení nestandardního tvaru bleskového přepětí	9
3	Spínací přepětí.....	12
3.1	Obecné informace	12
3.2	Výskyt a omezení spínacího přepětí.....	12
3.2.1	Vlivy parametrů systému	13
3.2.2	Metody k omezení spínacího přepětí.....	14
3.3	Přechodné spínací přepětí.....	16
3.4	Sekání proudu ve vakuových vypínačích	18
4	Zpětný přeskok	20
4.1	Obecné informace	20
4.2	Vznik zpětného přeskoku	21
4.3	Parametry mající vliv na průběh zpětného přeskoku	21
4.4	Parametry působící na vznik zpětného přeskoku	23
4.5	Ochrana při zpětném přeskoku.....	23
4.6	Zpětný přeskok u distribučních sítí	25
4.7	Metody hodnocení míry zpětného přeskoku	25
4.8	Ekonomické hodnocení	27
5	Závěr.....	28
	Reference.....	29

Seznam použitých symbolů

symbol	jednotky	význam symbolu
C_{SYS}	(F)	kapacita systému
f	(Hz)	frekvence oscilace
H	(m)	nadmořská výška
h_0	(m)	absolutní vlhkost vzduchu
I_n	(kA)	jmenovitý vybíjecí proud vodiče
I_z	(kA)	zkratový proud
K	(-)	činitel tvaru jiskřiště vyjadřující vliv tvaru jiskřiště na pevnost
K_a	(-)	korekční činitel nadmořské výšky
K_c	(-)	činitel koordinace
K_t	(-)	faktor atmosférické korekce
K_{tav}	(-)	faktor průměrné atmosférické korekce
$K_{\text{t-min}}$	(-)	faktor atmosférické korekce zvažující nejhorší podmínky
K_s	(-)	bezpečnostní faktor
k_h	(-)	parametr pro korekci vlhkosti
L_s	(H)	indukčnost zdroje
m, w	(-)	exponenty závisící na parametru g (definováno v IEC 60060-1)
P	(%)	pravděpodobnost přeskoğu samočinné obnovující se izolace
P_0	(hPa)	absolutní tlak vzduchu
t_s	(μs)	doba šíření přepětové vlny
U_c	(kV)	trvalé provozní napětí svodiče
U_{cw}	(kV)	koordinální výdržné napětí zařízení
U_m	(kV)	nejvyšší napětí pro zařízení
U_{pl}	(kV)	ochranná hladina svodiče při atmosférickém impulzu
U_{ps}	(kV)	ochranná hladina svodiče při spínacím impulzu
U_{rp}	(kV)	vrcholová hodnota reprezentativního přepětí
U_{rw}	(kV)	požadované výdržné napětí
U_{spec}	(kV)	specifikované napětí
U_{test}	(kV)	napětí v době zkoušky

Z_s	(Ω)	impedance zdroje
δ_0	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	relativní hustota vzduchu
v_0	$(^\circ\text{C})$	teplota vzduchu

Seznam použitých zkratek

Zkratka	význam zkratky	
CIGRE	International Council on Large Electric Systems	
EGLA	svodič přepětí s vnějším jiskřištěm	externally gapped line arrester
FFO	přepětí s rychlým čelem	fast-front overvoltage
GIS	plynem izolované spínací zařízení	gas isolation system
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
LIWV	výdržné napětí při atmosférickém impulzu	lightning impulse withstand voltage
LSA	svodič přepětí pro vedení	line surge arrester
MOSA	svodič přepětí z oxidů kovů	metal-oxide surge arrester
NGLA	svodič přepětí pro vedení bez jiskřiště	non-gapped line arrester
SFO	přepětí s pomalým čelem	slow-front overvoltage
SF ₆	Fluorid sírový	sulfur hexafluoride
TCV	zachycené napájecí napětí	trapped charge voltage
TRV	přechodné spínací přepětí	transient recovery voltage
UHV	ultra vysoké napětí	ultra high voltage
VFFO	přepětí s velmi rychlým čelem	very fast-front overvoltage

Seznam obrázků

Obr. 1 Koordinace izolace pro přepětí s velmi rychlým čelem [1]	5
Obr. 2 Základní úkoly atmosférické korekce při koordinaci izolace podle IEC 6007-1 [1]	6
Obr. 3 Srovnání atmosférické korekce $\delta \times kh$ s relativním tlakem vzduchu p/ps pro různé meteorologické stanice celého světa [1]	7
Obr. 4 Princip korekce nadmořské výšky: snižující se výdržné napětí zařízení s jeho rostoucí nadmořskou výškou [1]	8
Obr. 5 Příklady trvalých atmosférického přepětí [1]	9
Obr. 6 Atmosférické přepětí na GIS [1]	10
Obr. 7 Atmosférické přepětí na transformátoru [1]	11
Obr. 8 Průběh vyhodnocení tvaru pro GIS a transformátor [1]	11
Obr. 9 Schéma spínání pomocí předřadného rezistoru [6]	14
Obr. 10 Schéma zapojení svodiče přepětí ku chráněnému zařízení	15
Obr. 11 Schématický průběh řízeného spínání [8]	16
Obr. 12 Grafické znázornění systému pro analýzu přechodného napětí [2]	16
Obr. 13 Přechodné spínací přepětí napětí po přerušení proudu [2]	17
Obr. 14 TRV znázorněné na jednoduchých obvodech za normálních podmínek [2]	17
Obr. 15 Sekací proud a přechodné spínací přepětí znázorněné na typických průbězích [9]	19
Obr. 16 Znázornění vzniku zpětného přeskočení [29]	20
Obr. 17 Mechanismus zpětného přeskočení [18]	21
Obr. 18 Průběhy se změnou odporu patky [19]	22
Obr. 19 Průběhy se změnou parametrů proudu [19]	22
Obr. 20 Různé typy svodičů přepětí a jejich zapojení vůči vodiči [27]	24
Obr. 21 Situace po zpětném přeskočení na vedení po zapojení svodiče přepětí [28]	24
Obr. 22 Schéma po instalaci externího zemního vodiče [26]	27

1 Úvod

Podstatou této bakalářské práce, je zabývání se problematikou poruchových stavů v sítích vysokého napětí, jejich předcházení a tlumení následků. První kapitola vychází z normy pro koordinaci izolace, kdežto většina poznatků ve druhé a třetí kapitole je získána z odborných článků, zabývajících se danou problematikou za konkrétní situace.

V první části nalezneme informace o změnách u nového vydání normy ČSN EN IEC 60071-2 ed2, která se zabývá zajištěním bezpečného, spolehlivého a ekonomicky výhodného návrhu a provozu sítí vysokého napětí, rozvodu a zařízení. A to jak pomocí vhodných prováděných pokynů, tak i výběrem korektních izolačních hladin zařízení, nebo instalací pro trojfázové elektrické sítě. Účelem je navést k ustanovení jmenovitých výdržných napětí pro rozsahy uvedené v dané normě a zajištění přiřazení těchto jmenovitých hodnot k nejvyšším normalizovaným napětím. Podstatnou část tohoto bodu tvoří aktualizace informací o svodičích přepětí, jenž jsou ochranným zařízením, před již vzniklým přepětím. Zapojují se paralelně v blízkosti chráněného objektu z důvodu ochrany sítě nebo zařízení před různými typy přepětí jako jsou ty s pomalým, rychlým a velmi rychlým čelem. Nejběžnějším typem tohoto druhu ochranného zařízení je svodič přepětí z oxidů kovů, s označením MOSA, které se dělí na: s vnějším jiskřištěm a bez vnějšího jiskřiště. Nová verze normy se i zabývá korekcí atmosférických podmínek jenž jsou spjaté s nadmořskou výškou. Tato část definuje jak normalizované atmosférické hodnoty, tak i korekci z důvodu vychýlení od těchto hodnot, zapříčiněnou geografickou polohou anebo počasím, které se neustále mění.

Následující kapitolou je problematika spínacího přepětí, jenž je druhem přepětí, které se vyskytuje během různých spínacích operací, a to jak při poruchových stavech, tak i při běžných spínacích činnostech. Tato část se zabývá jeho vznikem i omezením následků, a to hlavně z důvodu rizika poškození izolace na zařízení, které je spojeno s daným přepětím. Jedná se jak o metody preventivní sloužící, k omezení vzniku, tak i o ty, jenž pomáhají tlumit následky po vzniku spínacího přepětí, mezi které spadají již zmíněné svodiče přepětí.

Poslední částí je záležitost zpětného přeskočení. Jedná se o jev v důsledku přímého úderu blesku do stožáru vysokého napětí nebo jeho stínícího lana, po němž nastane přeskok k vodiči fáze. V důsledku závažnosti škod a poruch, které může tento fenomén způsobit se jedná celkově o jeden z nejzávažnějších poruchových stavů na přenosových vedeních vůbec. Kromě obecných informací o vzniku a vlivu různých parametrů, způsobu ochrany pomocí svodiče a podobně, je součástí i bod o ekonomickém hodnocení na základě reálné studie.

2 Popis změn, které přináší nová verze ČSN EN IEC 60071-2 ed 2.

Norma ČSN EN IEC 60071-2 ed 2. je oficiálně brána, jako česká verze evropské normy EN IEC 60071-2:2018, která se zabývá koordinací izolace. Jejichž obsahem jsou informace o předpisech a volbě izolačních hladin zařízení, nebo instalací do trojfázových elektrických sítí se jmenovitým napětím nad 1 kV, a tudíž lze uvedené hodnoty použít pouze do zmíněných sítí vysokého napětí. Ovšem u dvou a jednofázových sítí, jsou zmíněné zásady rovněž v platnosti.

Součástí normy nejsou předpisy zabírající se bezpečností osob.

Nová verze nahrazuje předchozí verzi normy ČSN EN 60071-2 z prosince 2000, která však zůstává dál v platnosti v souladu s předmluvou k EN IEC 60071-2:2018 do dne 20.4.2021.

Hlavní změny proti předchozímu vydání normy:

- Zrušení přílohy zabývající se vzdušnými vzdálenostmi v instalacích pro zajištění stanoveného impulzního výdržného napětí;
- aktualizace částí zabírající se svodičů přepětí;
- revidování částí zabírající se přepětí s velmi rychlým čelem. S čímž je spojena i doplněná příloha zabývající se koordinací izolace u tohoto typu přepětí v rozvodnách UHV;
- doplnění přílohy o atmosférické korekci, konkrétně korekce pro nadmořskou výšku;
- doplnění o přílohu zabývající se hodnocením nestandardního tvaru bleskového přepětí. [1]

2.1 Svodiče přepětí

První změnou, o které pojednává nová verze normy ČSN EN 60071-2 ed. 2 je aktualizace informací o svodičích přepětí. Jejichž vhodné použití jako přepětěových ochran, je nezbytné pro zaručení spolehlivého, bezpečného a ekonomicky výhodného provozu v sítích vysokého napětí, v rozvodnách a taktéž i v zařízeních. Takové svodiče přepětí musí být navrženy a zapojeny tak, aby snížili rozsah přepětí na svorkách zařízení, které je chráněno. Nejčastěji se snažíme o ochranu před přepětím s pomalým (SFO) a rychlým čelem (FFO), při kterém nesmíme zapomenout, že není totožná hodnota přepětí na svorkách zařízení, sloužící k přepětěové ochraně a hodnota přepětí na svorkách chráněného zařízení.

Jako běžná ochrana se považují přepětěové svodiče z oxidů kovů (MOSA) bez jiskřiště, které by měly být nainstalovány ve veškerých rozvodnách nebo u pólů transformátorů a dále pak u koncovek kabelů distribučního vedení. Je nutné je instalovat v co nejmenší vzdálenosti k chráněnému zařízení, neboť tyto svodiče mají omezenou vzdálenost ochrany (mezi jednotkami až desítkami metrů). Svodiče MOSA se taktéž užívají i jako ochrana před přepětím pro přenosová a distribuční vedení (LSA), kde zamezují přeskokům na izolátorech způsobených přímým úderem blesku do nestíněného vodiče vedení, nebo vinou poškozeného stínění na stíněném vedení, anebo příčinou zpětného přeskoku. V takových případech se aplikují svodiče přepětí s vnějším jiskřištěm (EGLA) a bez jiskřiště (NGLA). Ovšem primárně by se měly aplikovat svodiče bez jiskřiště, jakožto zařízení pro omezení přepětí. Varianta s jiskřištěm by měla být pouze jako alternativní řešení, protože jiskřiště způsobuje na chráněném zařízení prudký nárůst přepětí.

Pro výběr vhodného svodiče přepětí je třeba určit trvalé provozní napětí U_c , jmenovité napětí U_r podle dočasného přepětí, jmenovitý vybíjecí proud I_n a požadovanou absorpci energie W , úroveň ochranné hladiny při atmosférickém impulzu U_{pl} a při spínacím impulzu U_{ps} . Výsledný stupeň ochrany lze použít pro reprezentativní přepětí s pomalým i s rychlým čelem. Avšak při přepětí s rychlým čelem je ochranná úroveň MOSA charakterizována ochrannou úrovní při atmosférickém impulzu U_{pl} a nejvyšším možném reziduálním napětím při strmém impulzu proudu. Kdežto při přepětí s pomalým čelem je ochranná úroveň MOSA popsána úrovní spínacího impulzu U_{ps} a maximálním reziduálním napětím při specifikovaném vybíjecím proudu spínacího impulzu. V případě, že se po výběru ukáže, že stupně ochrany MOSA jsou příliš vysoké, je třeba provést přezkoumání pro nižší trvalé napětí, vyšší vybíjecí proud, anebo sníženou vzdálenost svodiče a chráněného zařízení.

Poslední problematikou, kterou se zabývá tahle část normy, je schopnost MOSA řídit tok energie, která je popsána dvěma charakteristikami pro distribuční a rozvodné svodiče. Distribuční („D“) svodiče, které se následovně dělí podle odolnosti na DH, DM a DL. Taktéž rozvodné („S“) svodiče se dělí na svodiče SH, SM a SL. U obou případů druhé písmeno značí „vysokou“, „střední“ anebo „nízkou“ odolnost. Samotná dovednost svodiče regulovat tok energie přepětí pro vedení bez jiskřiště (NGLA), je definována charakteristikou MOSA a jeho jmenovitou vybíjecí schopností atmosférického impulzu. Kdežto svodiče přepětí pro vedení s vnějším jiskřištěm (EGLA) slouží k ochraně příslušenství izolátoru pouze před přeskoky vyvolané atmosférickými výboji. Proto je nezbytné stanovit charakteristiky ochrany svodiče vůči atmosférickému impulzu včetně přeskokového napětí pro atmosférický impulz s rychlým čelem a běžný atmosférický impulz. Další nezbytností je určení izolační odolnosti EGLA v soustavě vzhledem k nejvyššímu přepětí s pomalým čelem. [1]

2.2 Reprezentativní napětí a přepětí

Další změnou v normě je bod o reprezentativním napětí a přepětí. Na začátku bodu nám norma definuje trvalé napětí a dočasné přepětí. Za reálných podmínek sice očekáváme, že napětí síťového kmitočtu se bude pozměňovat a v různých místech i lišit, avšak pro návrhy izolace a koordinace je možné nejvyšší napětí sítě pokládat za napětí reprezentativní trvalé. Kdežto dočasná přepětí, je nutno popsat dobou jejich trvání, amplitudami a tvary průběhů. Nicméně po dobu přepětí se tvary můžou měnit a veškeré parametry jsou závislé na původu amplitudy a přepětí. Za dočasné přepětí považujeme přepětí krátkého trvání (1 min) normalizovaného napětí síťového kmitočtu. Jeho velikost lze určit pouze jedinou hodnotou předpokládaného maxima, nebo větším počtem amplitud, anebo statistickým rozdělením amplitud. Ovšem při výběru musíme vzít v úvahu amplitudu a dobu, během které dané přepětí v provozu skutečně trvá a dále pak závislost amplitudy výdržného napětí síťového kmitočtu pro danou izolaci. Pro případ, že tuto závislost neznáme, je nutné pro usnadnění aplikovat amplitudu, jejíž hodnota odpovídá skutečnému maximálnímu přepětí, a má zároveň reálné trvání v provozu pod 1 min, a to i přesto, že zvolená doba trvání odpovídá 1 min.

V dalším úseku se zabývá přepětím s pomalým čelem (SFO). Jenž je definováno dobou čela, která trvá desítky až tisíce mikrosekund a dobou týlu s velikostí stejného řádu, obě dvě tyto doby jsou oscilační. S tímto typem přepětí se můžeme setkat při spínání a rozpinání vedení; ztrátě zatížení; zkratech a jejich vypínání; dalekých úderech blesku do vodičů venkovního vedení a při spínání induktivních anebo kapacitních proudů. Reprezentativní napěťové namáhání lze znázornit pomocí reprezentativního tvaru

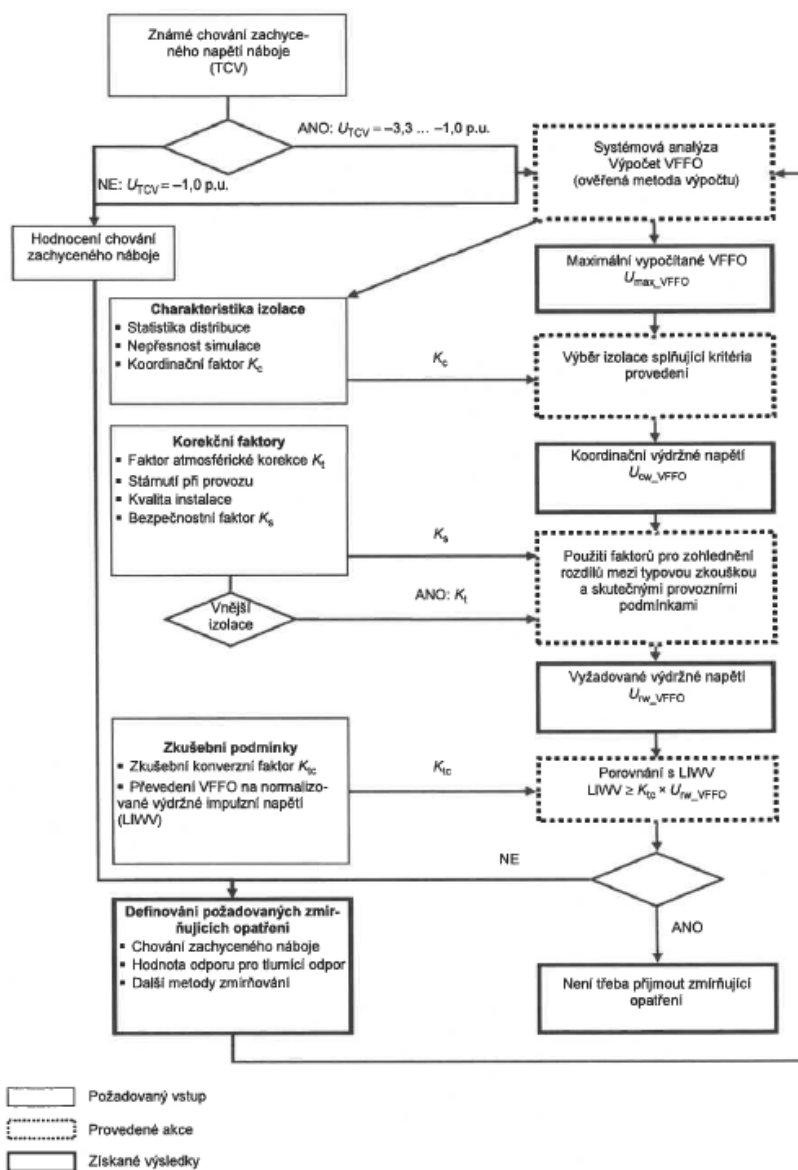
napětí, anebo reprezentativní vrcholovou hodnotou. Jedná se o normalizovaný spínací impuls, který má dobu čela 250 μs a dobu půltýlu 2500 μs . Jako nejužívanější způsob omezení tohoto typu přepětí je použití zapínacích odporů ve vypínacích vedení, použití varistorů na vypínacích komorách a elektronické ovládání sepnutí. Za účelem snížení zbytkového náboje na fázích vedení po vypnutí, lze použít induktivní přístrojové transformátory, jenž při nových spínacích cyklech přepětí omezují. Vhodnou ochranou pro přepětím s pomalým čelem se v sítích používají svodiče s kysličníky kovů bez jiskřišť a zvláště konstruované svodiče s jiskřišti. Avšak u svodičů s kysličníky kovů je třeba počítat s tím, že omezují špičkové hodnoty přepětí fáze-zem zhruba na dvojnásobek jmenovité hodnoty napětí svodiče. Proto jsou vhodné pro přepětí s pomalým čelem při spínání, opětovném spínání vedení a dále pak při spínání kapacitních nebo induktivních proudů. Ovšem ne pro přepětí způsobena zemním spojením a jeho odpojení, neboť v těchto případech očekáváme velmi malé špičkové hodnoty.

Následujícím přepětím je s rychlým čelem (FFO), se kterým se setkáme u přímého úderu do fázového vodiče, u zpětného přeskočků, anebo v případě, že úder blesku dopadne nedaleko od vedení a vznikne atmosférické přepětí. Obecně se dá říct, že indukovaná atmosférická přepětí, která vzniknou nepříznivým úderem se vyskytují na vedeních pod 400 kV. Z tohoto důvodu je tahle problematika podstatná pouze u soustav s nižším rozsahem napětí, a proto jsou méně častým jevem u soustav 500 kV a výše. Normalizovaný atmosférický impuls (1,2/50 μs) je brán jako reprezentativní tvar atmosférického přepětí. Jeho špičkový bod udává jeho předpokládané maximum, anebo rozložení pravděpodobnosti jeho špičkových bodů v závislosti na množství opakovaných přepětích. Atmosférická přepětí a jejich množství ve stanici jsou závislá na provozním napětí v momentu úderu; velikosti, uspořádání a obzvláště na množství propojených vedení a charakteristice vedení, která jsou připojena ke stanici během bouřky. Nicméně problém nastává u účinné ochrany, neboť špičkové hodnoty přepětí, které nejsou omezeny svodičem přepětí, bývají ve většině případů velmi vysoké na použití jako základ pro koordinaci izolace. Snížení výskytu atmosférických přepětí s rychlým čelem lze pomocí patřičného návrhu venkovního vedení. Konkrétně u přímého úderu blesku do vodičů, je vhodným návrhem rozuměno stínění pomocí zemnicích lan. Kdežto u zpětných přeskočků je tím vhodným návrhem zlepšení izolace, nebo zmenšení impedance uzemnění stožáru. Další metodou pro snížení rizika přepětí s rychlým čelem je vhodný výběr spínacích přístrojů, jako například bezprůrazové vypínače, kontrola spínání pomocí elektroniky a další. Efektivnost ochrany před přepětím s rychlým čelem pomocí svodičů přepětí je dána počtem připojených vedení a jejich vlnovou impedancí; vzdáleností svodiče ku chráněnému zařízení včetně uzemňovacích vodičů; tvarem přepětí a jeho špičkovým bodem; ochrannou charakteristikou svodiče přepětí; kapacitou a/nebo vlnovou impedancí chráněného zařízení; tvarem proudu a jeho špičkovou hodnotou ve svodiči přepětí. [1]

2.3 Přepětí s velmi rychlým čelem VFFO a jeho koordinace v UHV

Přepětí s velmi rychlým čelem (VFFO) vzniká během funkce odpojovače, nebo při průchodkách v zapouzdrěných stanicích. Vznikají z důvodu rychlého průrazu plynu mezi elektrodami a takřka netlumeného šíření vln ve stanicích. Avšak jejich špičkové hodnoty jsou rychle tlumeny při výstupu ze stanic průchodkami, a jejich hodnoty doby čela se zvyšují, až do nárůstu typu přepětí s rychlým čelem. Průběh přepětí je charakterizován rychlým nárůstem čela do 0,1 μs , který je doprovázen oscilací s hodnotou frekvence vyšší než 1 MHz. Amplituda VFFO závisí na konstrukčních vlastnostech odpojovače a konfiguraci rozvodny (v nejlepších případech dosáhne amplituda 2,8 p.u.). Tento typ

přepětí je nebezpečný v systémech ultra vysokého napětí, a to jak pro transformátory napětí, tak i pro izolaci GIS. VFFO se může stát mezní hodnotou pro dielektrické namáhání, které definuje rozměry GIS. U koordinace izolace VFFO se doporučuje takzvaný třístupňový postup. Viz obrázek níže.



Obr. 1 Koordinace izolace pro přepětí s velmi rychlým čelem [1]

Zmenšení rizika selhání může být dosaženo užitím odpojovače s malým záchytným napájecím napětím TCV, nebo odpojovače s integrovaným tlumicím odporem, anebo jiná přijatelná metoda, jako je třeba zvýšení výdržného napětí při atmosférickém impulzu LIWV. [1]

2.4 Atmosférická korekce – korekce pro nadmořskou výšku

Na začátku tahle příloha uvádí zkušební metody pro atmosférickou korekci a definuje normalizované hodnoty atmosféry. Mezi uvedené zkušební metody patří: metoda krátkodobým napájecím napětím; spínacím impulzovým napětím; atmosférickým impulzivním výdržným napětím a přímým napětím. Jako

normalizované hodnoty atmosféry se považují: teplota vzduchu ϑ_0 20 °C; absolutní tlak vzduchu p_0 1013 hPa a absolutní vlhkost vzduchu h_0 11 g·m⁻³. Každé odchýlení od normalizovaných hodnot, musí být opraveno pomocí korekčního faktoru. A to z důvodu změny na dielektrické pevnosti vnější izolace. Tato atmosférická korekce lze provést jen za předpokladu, že známe všechny potřebné údaje o atmosférických podmínkách, požadované úrovni izolace a rozměrech zařízení. Protože každou odchylku teploty vzduchu, vlhkosti, nebo tlaku vzduchu je třeba při výpočtu zohlednit a opravit, korekční faktor pro atmosférické podmínky má podobu:

$$K_t(t) = k_1 \cdot k_2 \quad (1)$$

k_1 korekční faktor hustoty vzduchu;

k_2 korekční faktor vlhkosti vzduchu;

$K_t(t)$ čas závislý na měnících se podmínkách v určitém časovém intervalu (sezóna, rok);

Pochopitelně v místě zkoušky se atmosférické podmínky postupem času mění, tudíž i postupem času se mění korekční faktor $K_t(t)$ a napětí v době zkoušky U_{test} , který slouží k prokázání specifikovaného napětí U_{spec} , jenž se váže k normalizované referenční atmosféře.

$$U_{spec} = \frac{U_{test}}{K_t(t)} \quad (2)$$

Hlavní úlohou atmosférické korekce při koordinaci izolace je určení jedné konkrétní hodnoty výdržného napětí pro zařízení v provozu na celý rok. Tudíž je třeba určit hodnoty výdržného napětí tak, aby riziko přeskočení bylo co nejvíce přijatelné, a to po celou dobu životnosti zařízení. Korekce musí být splněna tak, aby požadované výdržné napětí uspokojivě pokrývalo skutečné výdržné napětí v provozu.

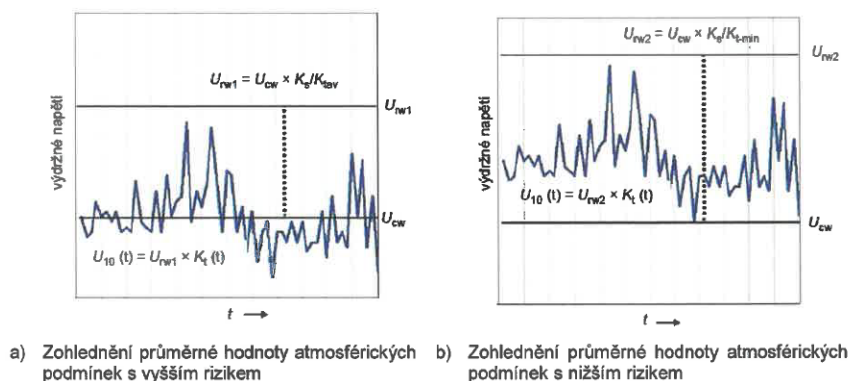
$$U_{rw} = \frac{K_s \cdot U_{cw}}{K_t} \quad (3)$$

U_{rw} vyžadované výdržné napětí;

U_{cw} koordinační výdržné napětí;

K_s bezpečnostní faktor;

K_t faktor atmosférické korekce;



Obr. 2 Základní úkoly atmosférické korekce při koordinaci izolace podle IEC 6007-1 [1]

Na výše uvedeném obrázku jsou znázorněny dva možné postupy, jak lze této korekce dosáhnout. Je patrné, že v případě a) vychází korekce z průměrné hodnoty atmosférické korekce K_{tav} , kdežto v případě b) zvažujeme nejhorší atmosférické podmínky $K_{\text{t-min}}$, což má za následek větší požadavek na výdržné napětí U_{rw} , ale také menší riziko selhání ve srovnání s předchozí metodou.

V otázce faktorů atmosférické korekce se nejčastěji setkáváme s případem pro konfiguraci v nehomogenním distribučním elektrickém poli. V takové situaci je parametr g pokaždé menší než 1,2 a exponenty se rovnají. Proto lze výsledný vztah zjednodušit.

$$K_t = k_1 \cdot k_2 = \delta^m \cdot k_h^m = (\delta \cdot k_h)^m \quad (4)$$

δ relativní hustota vzduchu;

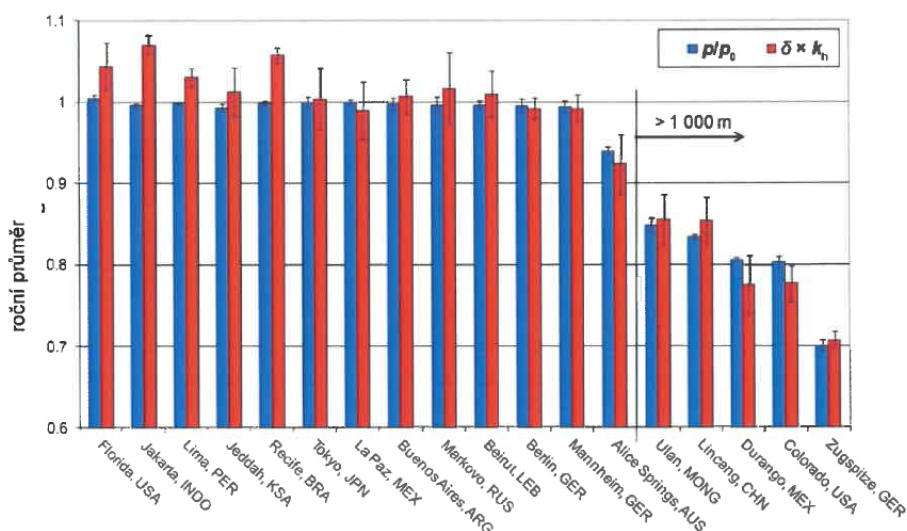
k_h parametr vlhkosti závisící na hustotě vzduchu a zkušebním napětí;

m, w exponenty závisící na parametru g (parametr je definován v IEC 60060-1)

V praxi se nejčastěji setkáváme s podmínkami pro mírné podnebí, kde se však objevuje problém s relativní vlhkostí vzduchu δ , neboť v zimních obdobích dosahuje vysokých hodnot díky nízké teplotě, ale v letním období zase nízkých z důvodu vysokých teplot. Z tohoto důvodu je zaveden korekční faktor k_h , který má opačnou tendenci než relativní vlhkost vzduchu, tudíž v případě vzájemné součiny se tyto hodnoty navzájem kompenzují. Obdobný postup platí i u velkých nadmořských výšek, kde je část rovnice $T_0/T \cdot k_h$ v oblasti mírného podnebí rovna téměř vždy hodnotě 1, a to bez ohledu na nadmořskou výšku.

$$K_t = [\delta \cdot k_h]^m = \left[\frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot k_h \right]^m = \left[\frac{p}{p_0} \right]^m \quad (5)$$

Podmínky, u nichž rozdíl celkové atmosférické korekce a korekce souvisící s tlakem je mimo rozsah normalizované odchylky hodnot pro mírné klima. Jsou považovány za takzvané zvláštní atmosférické podmínky. Pro takové podmínky se vyžaduje i zvláštní pozornost, ovšem neexistuje specifická kompenzace a ani úplná korekce pro danou oblast. Lze však tyto podmínky zjednodušit tím, že vezmeme v úvahu pouze relativní tlak. Na obrázku níže si můžeme všimnout rozdílů mezi atmosférickou korekcí s relativním tlakem vzduchu napříč celým světem. Rozdíly jsou patrné hlavně u měst jako je např. Jakarta nebo Recife, jenž se nachází v tropickém podnebí s vysokou teplotou i vlhkostí.



Obr. 3 Srovnání atmosférické korekce $\delta \cdot k_h$ s relativním tlakem vzduchu p/p_0 pro různé meteorologické stanice celého světa [1]

V další části se příloha zabývá nadmořskou výškou a její korekcí. Neboť obecně lze říct že, se zvyšující se nadmořskou výškou klesá odolnost výdržného napětí. Z důvodu zajištění požadovaného výdržného napětí pro danou výšku zavádíme takzvaný korekční faktor nadmořské výšky. V podstatě se jedná o zjednodušenou atmosférickou korekci tudíž, rozdíly v atmosférických podmínkách ve zvýšené nadmořské výšce lze popsat pouze pomocí nadmořské výšky H instalovaného zařízení, kde korekční faktor K_t lze zapsat v exponenciálním tvaru.

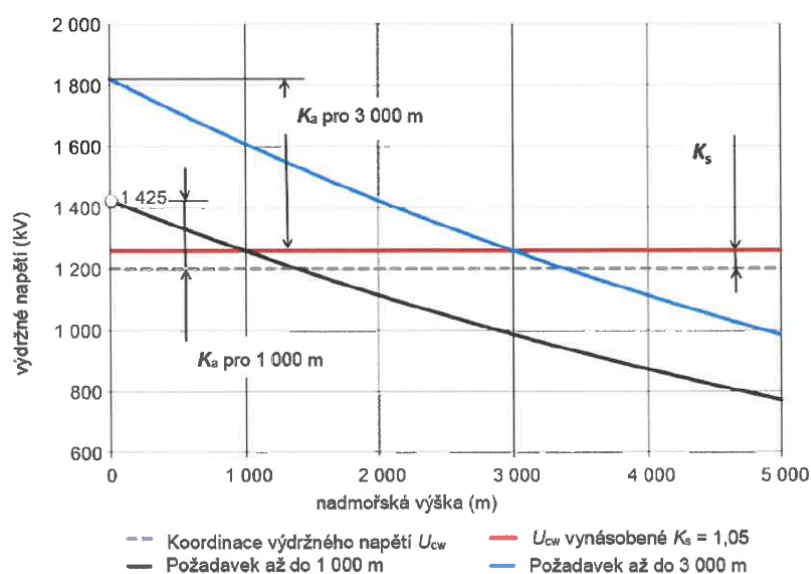
$$K_t = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m = e^{-m \frac{H}{8150}} \quad (6)$$

Z důvodu zajištění požadované odolnosti výdržného napětí v určité nadmořské výšce, zavádíme korekční faktor nadmořské výšky.

$$K_a = \frac{1}{K_t} = e^{m \frac{H}{8150}} \quad (7)$$

Na níže uvedeném obrázku je ukázaná názorná korekce pro nadmořskou výšku. Průběh znázorňuje patrný pokles vlastního výdržného napětí s rostoucí nadmořskou výškou, která vychází z jmenovité hodnoty napětí při úrovni moře. Oba průběhy jsou pro stejné výdržné napětí, ale červený průběh značí požadavek na výdržné napětí do 1000 m a modrý do 3000 m. Počáteční velikost výdržného napětí do výšky 1000 m byla vypočtena podle vzorce na 1425 kV tak, aby při nadmořské výšce hodnota odpovídala požadovanému výdržnému napětí ($K_s = 1,05$ - hodnota doporučená pro vnější izolaci; $K_a = 1,13$ - podle tlaku v 1000 m). Obdobně byla i získána hodnota 1822 kV pro průběh do 3000 m ($K_a = 1,45$ - podle tlaku v 3000 m).

$$U_{rw} = K_s \cdot K_a \cdot U_{cw} = 1,05 \cdot 1,13 \cdot 1200 \cdot 10^3 = 1425 \text{ kV} \quad (8)$$



Obr. 4 Princip korekce nadmořské výšky: snižující se výdržné napětí zařízení s jeho rostoucí nadmořskou výškou [1]

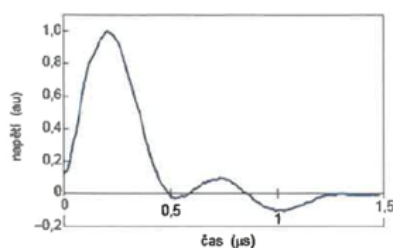
Zařízení musí vyhovovat požadavkům, které jsou spjaté s prostředím podle existujících norem IEC. Pro provoz do 1000 metrů nad mořem stanovuje provoz norma IEC60071-1, jejíž obsahem je i normalizovaný seznam jmenovitých výdržných napětí, které vycházejí ze zkušeností provozu zařízení. Specifická pozornost však musí být dbána na vnější izolaci ve vyšší výšce než 1000 m nad mořem, neboť musí být zvýšeny i normalizované úrovně napětí podle vzorce:

$$K_{a1000} = e^{m \frac{H-1000}{8150}} \quad (8)$$

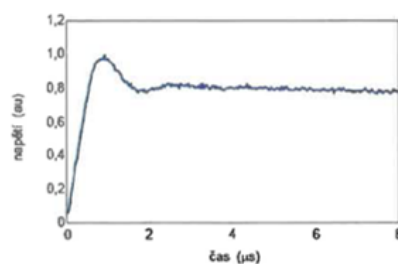
2.5 Způsob hodnocení nestandardního tvaru bleskového přepětí

U koordinace izolace se předpokládá „typické přepětí“ tak, že jeho tvar představují normalizované tvary průběhů napětí. Bylo analyzováno pole skutečných rázových vln v porovnání s normalizovanými tvary napětí z hlediska časového průběhu atmosférických rázových vln a byla navržena metoda průběhu pro GIS a pro transformátory. Taktéž bylo vydedukováno pět výsledných tvarů s dobou náběhu špičky pohybující se od 0,1 μs až 1,0 μs u GIS a od 0,5 μs po 1,5 μs pro transformátor.

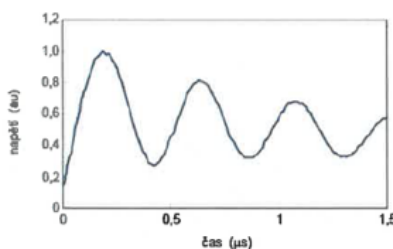
- Tvar A: impulzní tvar při velkém rozkladu DC složky a/nebo oscilační složky tvarů B, C a D
- Tvar B: čelo strmější impulzní tvar a plochý týl, výskyt v závislosti na vztahu polohy a chráněných bodů, jestliže působí bleskojistka
- Tvar C: první špička je maximální, pak tlumený oscilační tvar, výskyt v důsledku záporného a/nebo kladného odrazu vevnitř a/nebo vně rozvodny
- Tvar D: druhá špička má hodnotu výkyvu, poté tlumený oscilační tvar, výskyt v důsledku záporného a/nebo kladného odrazu vevnitř a/nebo vně rozvodny
- Tvar E: oscilační tvar s dvojitou frekvencí horní frekvence, vytváří se při průběhu opětovného náběhu uvnitř rozvodny jako odpojovač přepětí, pokud jsou dvě trasy kmitání uvnitř rozvodny



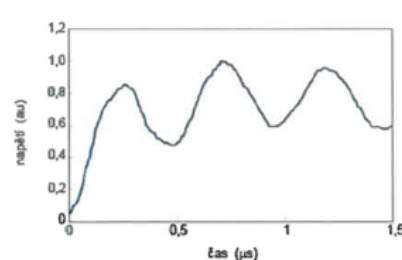
Tvar A



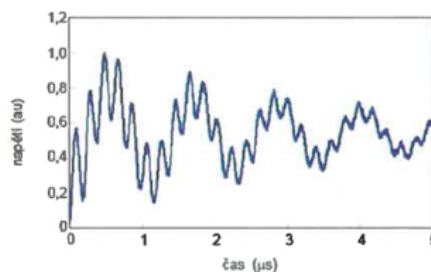
Tvar B



Tvar C



Tvar D



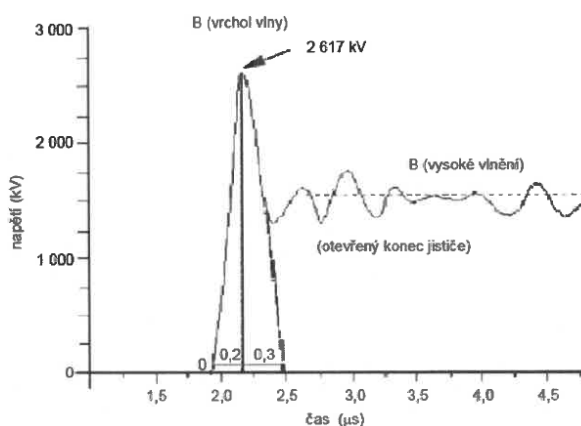
Tvar E

Obr. 5 Příklady trvalých atmosférického přepětí [1]

U hodnocení tvaru přepětí pro GIS se průběhy skládají z prvků, které zahrnují tvar každé oscilace, ploché části atd. Pomocí charakteristik tvarů atmosférických přepětí se vyhodnotí průběhy, a nakonec se špičková hodnota vyhodnotí na ekvivalentní tvar normalizovaného napětí. Na Obr. 8 je znázorněn celý postup hodnocení průběhu pro GIS i transformátory formou vývojového diagramu.

Tabulka 1 - Hodnocení atmosférického přepětí v GIS systému UHV [1]

Prvek tvaru	80 % doby trvání	Vrcholová hodnota napětí	Hodnotící poměr	Normalizovaný ekvivalent napětí atmosférického impulzu
B (tvar vrcholu)	0,16 μ s	2617 kV	1,25 (1,30)	2094 kV [$\eta = 0,60$] (2016 kV [$\eta = 0,45$])
B (tvar týlu)	-	1517 kV	0,90	1686 kV

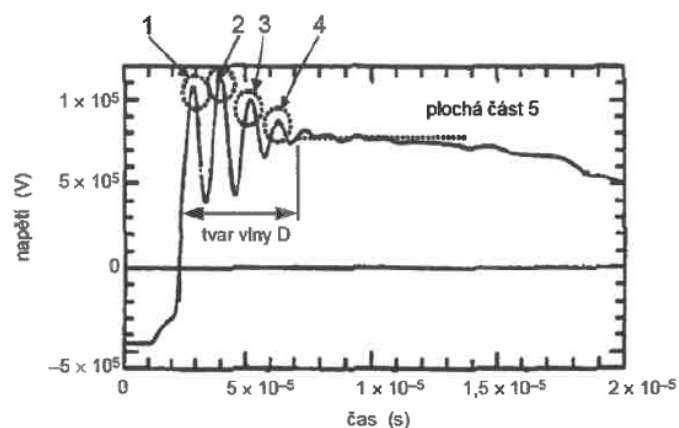


Obr. 6 Atmosférické přepětí na GIS [1]

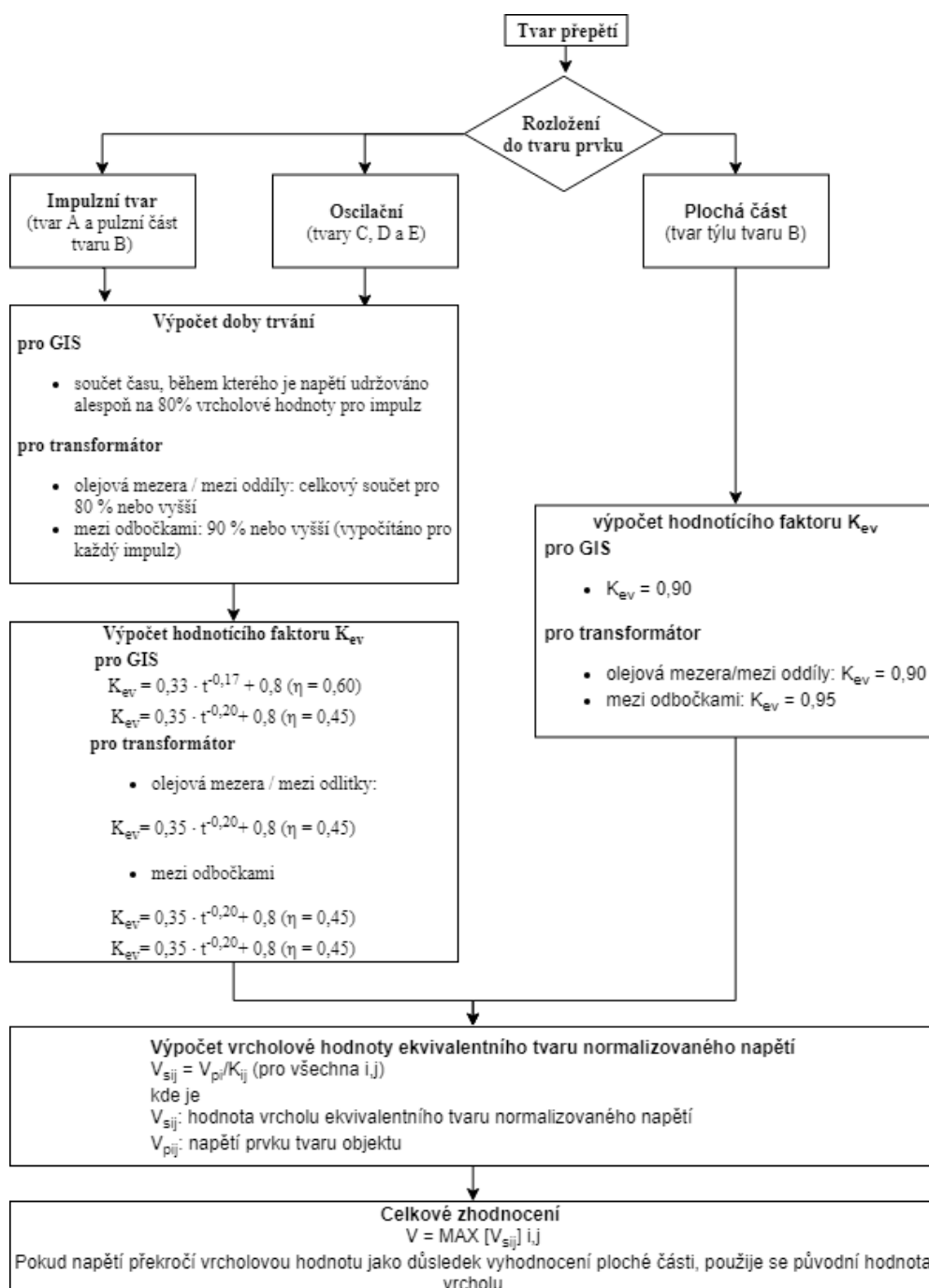
Pro hodnocení tvaru přepětí u transformátorů se výsledný průběh dělí na prvky V_{pij} , které obsahují tvar všech oscilací, ploché části atd. Vyhodnotí se pomocí charakteristik tvarů atmosférických přepětí a závěrem se určí velikost špičky jako normalizované napětí V_{pij} . [1]

Tabulka 2 - Hodnocení atmosférického přepětí v transformátoru systému 500 kV [1]

Izolační prvek	Tvar prvku	Doba trvání	Vrcholové napětí	Hodnotící poměr	Normalizovaný ekvivalent napětí atmosférického impulzu
Olejová mezera / mezioddílová izolace	Oscilační části (1-4): C nebo D	0,84 μ s	1158 kV	1,40	827 kV
	Plochá část (5)	-	784 kV	0,90	871 kV
Meziodbočková izolace	Maximální impulz (2)	0,35 μ s	1158 kV	1,24	934 kV
	Ostatní impulzy (1)	0,35 μ s	1084 kV	1,24	874 kV
	Plochá část (5)	-	784 kV	0,95	825 kV



Obr. 7 Atmosférické přepětí na transformátoru [1]



Obr. 8 Průběh vyhodnocení tvaru pro GIS a transformátor [1]

3 Spínací přepětí

3.1 Obecné informace

Jak už je z názvu patrné, jedná se o druh přepětí vyskytující se během různých spínacích operací. Rozlišujeme však, o jaký typ činnosti se jedná, neboť po spínací operaci protékají obvodem přechodné proudy, zatímco po rozpínací se na spínacím zařízení objeví přechodné spínací přepětí.

Jak už bylo zmíněno, tento typ přepětí může být způsoben spínacími operacemi prováděných v elektrických sítích, to znamená, že spínací přepětí může být produkováno například z důvodu:

- zapínání nezatížené linky;
- z důvodu poruchy (zemní spojení, zkrat atd.);
- přerušení kapacitních, nebo indukčních proudů.

Což znamená, že se spínacím přepětím se nesetkáme jen při neplánovaných spínacích akcích, například z důvodu přerušení zkratového proudu, ale i u těch rutinních, které jsou běžně v elektroenergetice prováděny, a to jak na úrovni vysokonapětových, tak i v nízkonapětových sítích.

Tento přechodný stav způsobený spínací operací nemívá dlouhé trvání. Šíří se v obou směrech elektrizační soustavy a je prostřednictvím transformátů přenášen buď to induktivně, nebo kapacitně na jiné úrovně napětí. V části vedení transformátu, při tomto jevu mohou vzniknout rezonance.

Každopádně každý průběh tohoto přepětí se liší svojí velikostí i závažností, tudíž nejsou všechna přepětí tohoto typu stejně nebezpečná pro izolace, a tedy i pro celý systém. Dokonce i přepětí o stejné špičkové hodnotě mohou mít odlišnou závažnost. Navíc je spínací přepětí tlumeno několika parametry, jako je například odpor a vodivost. S rostoucím napětím roste i význam spínacího přepětí. Nicméně závažnosti způsobené spínacím přepětím nedosahují takového významu jako ty způsobené činností blesku. [2] [3]

3.2 Výskyt a omezení spínacího přepětí

Spínacím přepětím v distribučních a přenosových soustavách nelze úplně zabránit, ale jejich účinky a velikost lze alespoň minimalizovat. A to použitím vhodných opatření, návrhem a v některých případech i provozem. Omezit přepětí způsobené spínací operací se snažíme převážně z toho důvodu, že vzniklé přepětí může vést k poškození, nebo až k selhání izolace zařízení. Samotná závažnost poškození izolace závisí převážně na velikosti a době trvání přepětí. Tudíž jeho omezením dosáhneme snížení důsledků způsobených spínacím přepětím. [2] [4]

3.2.1 Vlivy parametrů systému

1) Impedance zdroje

Impedance zdroje a zkratový výkon elektrické soustavy se liší pro každou rozvodnu, a to v důsledku vzdálenosti od elektrárny. Poměr X/R taktéž závisí na umístění rozvodny. Samotná impedance zdroje lze zjistit pomocí napětí sítě a zkratového proudu, podle vztahu (10).

$$Z_S = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_Z} \quad (10)$$

Z_S impedance zdroje

U napětí na vedení

I_Z zkratový proud

Obecně lze říct, že čím větší je zkratový proud, tím nižší je impedance zdroje, což vede k vyšší frekvenci kmitů, jenž lze vysvětlit pomocí (11). Obecně lze považovat daný obvod za RLC obvod, kde induktor s kondenzátorem způsobují oscilaci, kdežto odpor tlumí spínací přepětí.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S \cdot C_{SYS}}} \quad (11)$$

f frekvence oscilace

L_S indukčnost zdroje

C_{SYS} kapacita systému

2) Délka nadzemního vedení

Za předpokladu, že soustava je připojena k zátěži pouze pomocí nadzemního vedení. Lze stanovit, že s rostoucí délkou vedení, roste i velikost spínacího přepětí. Současně i vzrůstá hodnota indukčnosti s kapacitou systému, což vede k nižší frekvenci kmitání, jenž odpovídá opět vztahu (11).

3) Délka podzemního kabelu

V případě stejných podmínek připojení, jako u nadzemního vedení, nemá délka podzemního kabelu vliv na velikost přepětí a závislost frekvence oscilace znovu odpovídá (11).

4) Kombinace nadzemního vedení a podzemního kabelu

Vzhledem ke dvou předešlým případům, lze usoudit, že závažnost přepětí lze snížit připojením podzemního kabelu před zátěž. V případě porovnání frekvence kmitání lze stanovit, že nadzemní vedení má vyšší hodnoty frekvence než podzemní kabel, protože kapacita kabelu je vyšší než kapacita vedení. Proto pokud máme konstantní délku venkovního vedení, ale různou délku podzemního kabelu, tak zjistíme, že čím větší je délka podzemního kabelu tím nižší je frekvence kmitání. Neboť čím delší kabel je, tím větší má kapacitu a vyšší kapacita nám způsobuje, nižší kmitočet oscilace.

5) Zátěž

Nejhorších hodnot přepětí dosahujeme za situace bez zátěže neboli naprázdno. Neboť odpor a indukčnost zátěže má za následek i zvýšenou spotřebu elektrické energie na zátěži, které vede k utlumení průběhu přepětí, a i k nižší frekvenci kmitání.

6) Izolace

Mezinárodní norma IEC 60071-1, která se vztahuje ke koordinaci izolace udává dva druhy izolace. První je izolace samoobnovitelná a druhá je ta, která tuto vlastnost nemá. Samoobnovitelnou izolací myslíme tu, která po rušivém výboji je schopna zcela obnovit své izolační vlastnosti do stavu před výbojem. Kdežto druhý typ izolace ztrácí izolační vlastnosti, anebo se po výboji zcela nezotaví, proto se u tohoto typu volí o hladinu vyšší úroveň izolace, než je očekávané přepětí.

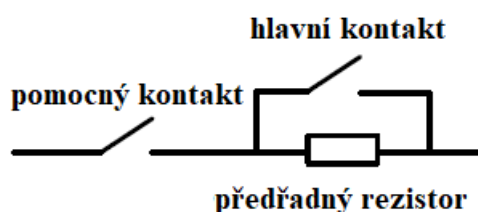
Podle mezinárodní normy IEC 60071-2, jsou definovány standardní úrovně izolace zařízení pomocí dvou standardů. Pomocí výdržného napětí impulzu blesku a krátkodobého výdržného napětí kmitočtu. Degradace izolace časem je však nevyhnutelná, takže stárnoucí izolace nemusí odolávat hodnotám přepětí, na které byla původně vypočtena. Proto z důvodu předejití předčasného selhání je třeba provádět na izolaci preventivní údržbu, tak aby izolační velikost splňovala přijatelnou rezervu.

[4]

3.2.2 Metody k omezení spínacího přepětí

1) Předřadný rezistor

Jedná se o tradiční metodu sloužící ke snižování spínacího přepětí pomocí instalace předřadných rezistorů paralelně ke spínacímu zařízení. V některých zemích je tahle metoda stále brána jako významná, ne-li jako primární metoda k dosažení omezení spínacího přepětí. Avšak většina výrobců spínacích zařízení ji již nedoporučuje. A to především z důvodu vysokých nákladů, složité technologie a v některých případech i vysoké poruchovosti, která snižuje spolehlivost celého systému.

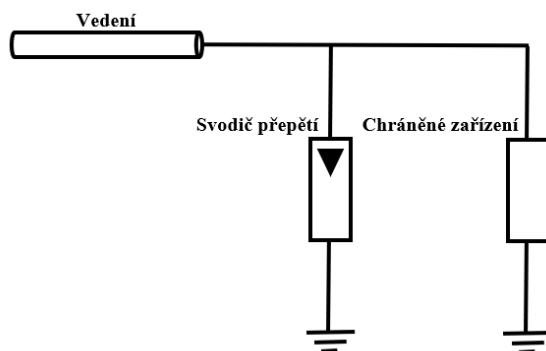


Obr. 9 Schéma spínání pomocí předřadného rezistoru [6]

Metoda pracuje na principu, kdy v případě povelu k sepnutí, se nejprve sepne pomocný kontakt v sérii s předřadným rezistorem, který poté účinně potlačí spínací přepětí. Teprve pár milisekund na to se sepnou kontakty hlavního spínače a odpor je tímto způsobem přemostěn. Tento způsob ochrany dokáže účinně snížit hodnotu spínacího přepětí, a to i o desítky procent. [5] [7]

2) Svodiče přepětí

Jedná se o další účinnou a běžně užívanou metodu ke zmírnění spínacího přepětí. Její podstatou je ochrana izolace zařízení jak u přenosových, tak i u distribučních sítí. Svodičem přepětí obecně nazýváme zařízení sloužící k ochraně zařízení před již vzniklým přepětím. Podle jejich způsobu provedení je dělíme na: koordinační jiskřiště, bleskojistky a omezovače přepětí. Základním principem je snížení své impedance při zvýšení velikosti napětí a následné svedení poruchového proudu do země. A po svedení, opětovný nárůst impedance zařízení na původní hladinu tak, aby ním neprotékal žádný proud. Svodiče se instalují paralelně vůči chráněnému zařízení a měly by být umístěny v co nejmenší vzdálenosti k chráněnému zařízení, neboť mají omezenou vzdálenost ochrany. Mezi neužívanější svodiče přepětí patří ty z oxidu kovu. [5] [6]

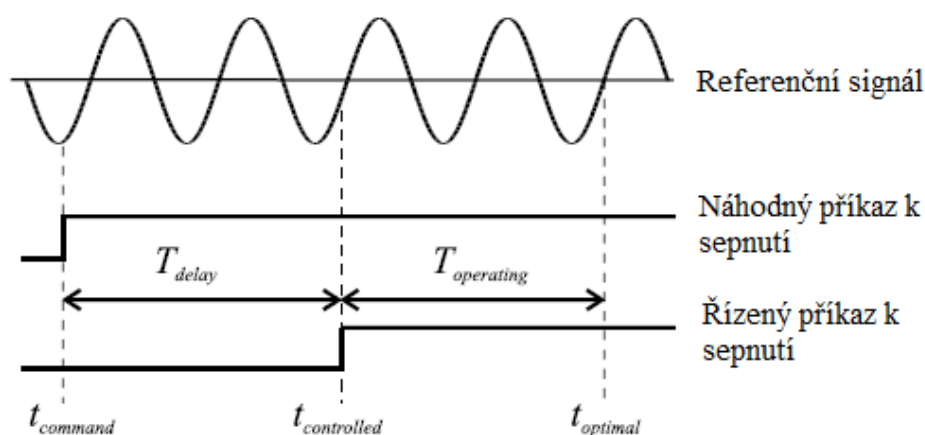


Obr. 10 Schéma zapojení svodiče přepětí ku chráněnému zařízení

3) Řízené spínání

Jedná se o další metodu pro odstranění rizika přepětí, tentokrát prostřednictvím časově řízených spínacích operací pomocí řídicí jednotky. Zásadní rozdíl oproti předešlým metodám je v tom, že tento způsob ochrany se snaží minimalizovat samotný vznik přepětí, kdežto předešlé pouze tlumily následky. S tímto snížením přepětí souvisí i snížená hladina napětí v soustavě a jejích součástech, což má pozitivní dopad na stárnutí zařízení. Metoda taktéž eliminuje potřebu předběžných odporů, čímž i snižuje náklady na spínací zařízení.

Příkazy pro sepnutí, nebo rozpojení kontaktů vypínače jsou prováděny pomocí přesných relé a jsou zpožděny takovým způsobem, aby k rozpojení nebo spojení kontaktů došlo v optimálním časovém okamžiku, který souvisí s fázovým úhlem nejlépe tak, aby nenastalo žádné přepětí. Konkrétně se jedná o moment, kdy je průběh v nulové hodnotě. Optimalizace okamžiku rozpojení kontaktů také znamená, že se omezí závažnost negativních jevů, jenž mají vliv na životnost.

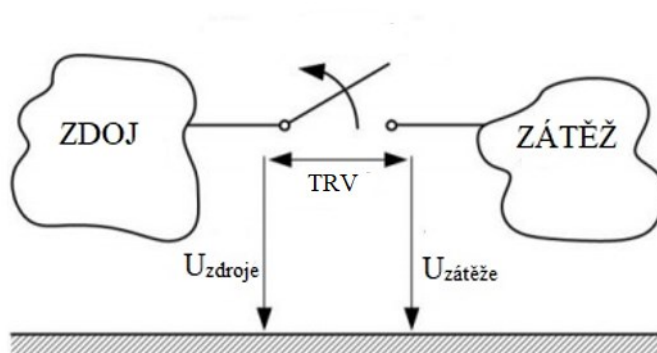


Obr. 11 Schématický průběh řízeného spínání [8]

Na výše uvedeném obrázku jde názorně vidět princip řízeného spínání, kde T_{delay} značí dobu zpoždění trvající od náhodného příkazu sepnutí po příkaz k řízenému sepnutí. Tento časový interval společně s dobou $T_{\text{operating}}$ značící dobu pohybu kontaktů (obvykle asi 50 ms), jenž zapříčiní sepnutí v tom nejvýhodnějším okamžiku. [5] [8] [15]

3.3 Přechodné spínací přepětí

Před samotným výběrem spínacího přístroje musí být řádně vyhodnoceny přechodné podmínky. Ovšem je nutné vzít v potaz nejen systémové parametry (provozní napětí, impedanční poměr, velikost zátěžného proudu atd.), ale i požadavky na stavy způsobené přechodným přepětím. Všechny typy zařízení sloužící k přerušení obvodu, lze brát zároveň i jako zařízení pro spojení dvou částí elektrické sítě, kde na jedné straně je elektrická síť, která dodává energii a na straně druhé síť zátěž, která dodanou energii spotřebovává. Když se kontakty těchto dvou částí sítě začnou oddalovat, vytvoří se přes ně okamžitě přechodné napětí, které je známo jako přechodné spínací přepětí (můžeme se setkat i se zkratkou TRV, která vychází z anglického označení „transient recovery voltage“), jenž může mít mnoho charakteristik v závislosti na provozních podmínkách, spínacím uspořádáním, parametrech a topologii sítě.

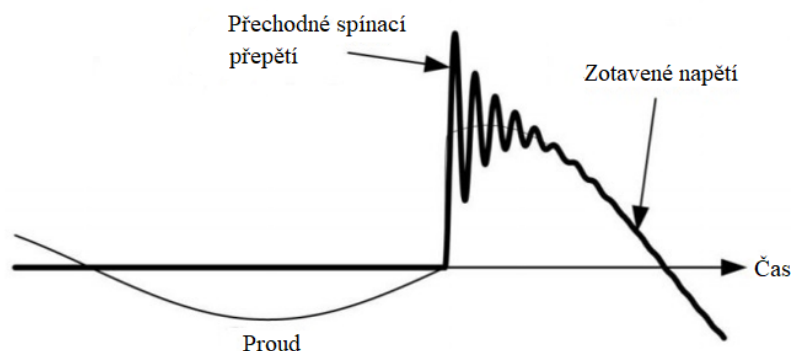


Obr. 12 Grafické znázornění systému pro analýzu přechodného napětí [2]

K samotnému získání tvaru přechodného spínacího přepětí může stačit i pouze analýza přechodné odezvy, neboť toto napětí je v ustáleném stavu nulové. Nicméně zotavené napětí se skládá ze dvou

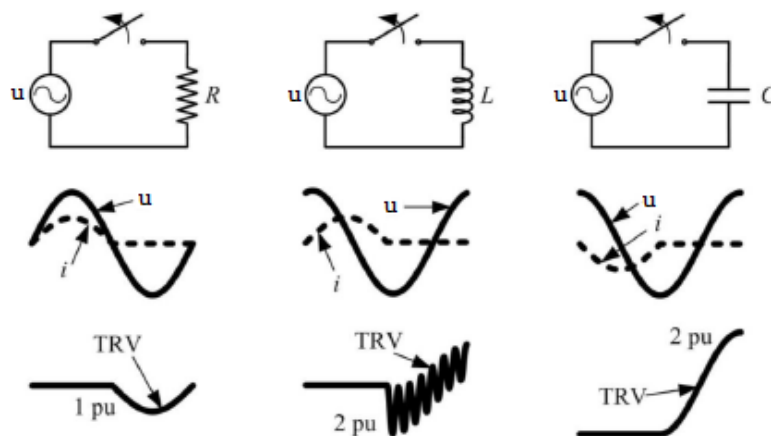
složek, a to složky přechodné (výskyt po nulové hodnotě proudu) a složky v ustáleném stavu (napětí po vymizení přechodné vlny). Přechodné spínací přepětí, lze definovat specifikováním amplitudy čela a dobou jenž je třeba k dosažení úplného jejího nárůstu. Tyto specifika jsou důležitá pro životnost a pro správné fungování spínacích zařízení. Výpočet rychlosti nárůstu je důležitým parametrem, avšak může být komplikován přirozenými kmitočty a kmitočty částí, jenž jsou přerušeny.

Samotný průběh přechodného spínacího přepětí je ovlivněn mnoha faktory, mezi které patří i parametry zátěže, anebo provozní podmínky. S nejstrmějšími nárůsty se setkáváme při zkratech. Lze se taktéž setkat i multifrekvenčními průběhy.



Obr. 13 Přechodné spínací přepětí napětí po přerušení proudu [2]

Přechodné spínací napětí na svorkách spínacího zařízení při přerušení obvodu lze během neporuchových stavů znázornit i pomocí velmi jednoduchých obvodů. I když skutečné případy jsou mnohem složitější, lze systémy klasifikovat podle typu zátěže jako odporové, induktivní a kapacitní. Kde odporové systémy jsou těmi nejjednoduššími a induktivní s kapacitními jsou složitější. Protože u těchto typů přechodného přepětí nabývá řádově dvojnásobných hodnot než u případů odporových. Ovšem ještě s vyššími hodnotami přechodného přepětí se setkáme u systémů třífázových. U induktivních systémů se můžeme setkat i s vyprodukovaním vysokofrekvenčního přechodného spínacího přepětí, jenž může společně s předčasnou nulou proudu (ukončení proudu před jeho přirozenou nulou) zapříčinit závažné hodnoty přechodného spínacího přepětí. Oproti tomu oscilace u kapacitní zátěže tento problém prakticky chybí, neboť vysoká kapacita má za následek zmenšení kmitočtu kmitání a taktéž pomalý nárůst přechodného spínacího přepětí. [2]



Obr. 14 TRV znázorněné na jednoduchých obvodech za normálních podmínek [2]

3.4 Sekání proudu ve vakuových vypínačích

Pod pojmem sekání proudu rozumíme stav, kdy je proud vypnut mimo moment, kdy se nachází v hodnotě nula, která se vyskytuje v jeho každém půlcyklu. Děje se tak z důvodu nestability elektrického oblouku uvnitř vypínače. Neboť snížením hodnoty proudu mezi kontakty spínacího zařízení se snižuje i množství uvolněné kovové páry, což způsobí pokles plazmy uvnitř spínače, jenž má za následek neudržení oblouku před nulovou hodnotou proudu. Tento fenomén způsobuje značné problémy u spínacích operací, neboť zachycený proud na straně induktivní zátěže může vyvolat značné přetížení v důsledku velikosti seknutí. Z tohoto důvodu se snažíme, aby hodnota tohoto proudu byla co nejmenší. [11] [12]

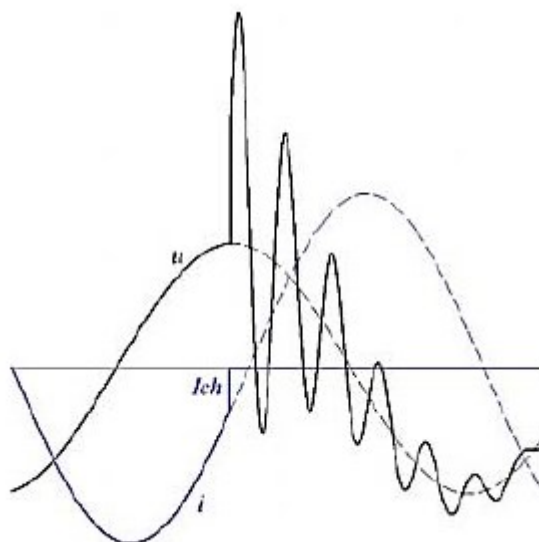
Jednu z klíčových rolí u přenosových a distribučních soustav hrají vypínače. A to jak z důvodu rychlé ochrany před poškozením komponentů, tak i z důvodu spínací činnosti zátěže, jako je například deaktivace kompenzátorů, transformátorů atd. Vypínače by měly být navrženy podle několika parametrů, jako jsou například tepelné aspekty při spínání, vypnutí v nulové hodnotě proudu, elektrické a mechanické děje během spínání. V závislosti na zhašecím médiu dělíme vypínače na tlakovzdušné, olejové, SF₆ a vakuové. I když se sekáním proudu setkáváme u všech zmíněných typů vypínače, tak s nejvyššími hodnotami se setkáváme u vakuových. [9] [14]

I přes tento fakt jsou vakuové vypínače nejužívanějším typem ze všech, a to po celém světě. Především z důvodu jejich výhod, a to jak elektrických, mechanických tak i ekologických, které je odlišují od ostatních typů, konkrétně se jedná o:

- pevnost mezi kontakty se velmi rychle obnoví, neboť vakuum má vysokou míru dielektrické regenerace;
- dlouhá životnost při nízkých nákladech na údržbu, nutná kontrola například až po 10 letech provozu;
- omezení negativního dopadu na životní prostředí, neboť během spínání nedochází k uvolňování emisí;
- použití vakua uvnitř komory jako zhašecího média umožňuje se vyhnout škodlivým plynům (jako je SF₆);
- jejich životnost se odhaduje na 2 000 cyklů pro jmenovitý proud a 100 cyklů pro vypínací proud;
- vzhledem k izolaci oblouku od okolí při neuzítí nebezpečných sloučenin se považují za bezpečné pro životní prostředí.

Ovšem kritickým bodem vakuových vypínačů je volba materiálu pro kontakty. Neboť tato volba materiálu ovlivňuje úroveň proudu, který lze přerušit. Nejužívanějšími materiály jsou slitiny Cu-Bi (mědi a bismutu) nebo Cu-Cr (mědi a chromu). Jejichž výpary jsou následně důležitým faktorem pro řízení elektrického oblouku při vypínání. [11] [14]

Zvolené materiály pro kontakty vakuového vypínače mají také vliv na schopnost přerušit proud před momentem, kdy je hodnota proudu nula. Jelikož má vakuový vypínač vysokou schopnost přerušování, stalo se u něj sekání proudu prakticky běžným jevem. Před samotným useknutím proudu je na vypínači napětí, které odpovídá napětí oblouku, avšak v momentě, kdy dojde k useknutí proudu, objeví se na vypínači značné přechodné spínací přepětí, které se postupným kmitáním dostane na hodnotu síťového napětí. Nicméně toto přechodné spínací přepětí může mít za následek i poškození a následně selhání zařízení, které je k němu připojeno, a proto je třeba s tímto přepětím nutno počítat. [9] [10] [11] [12] [13] [14]



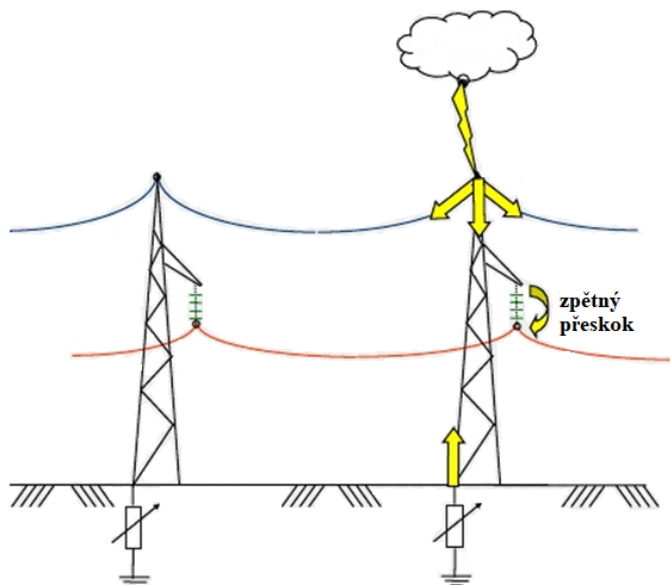
Obr. 15 Sekací proud a přechodné spínací přepětí znázorněné na typických průbězích [9]

4 Zpětný přeskok

4.1 Obecné informace

Blesk jakožto přírodní elektrostatický výboj je pro nás znám již od počátku lidstva. I přesto, že první patenty na ochranu před tímto jevem pocházejí z 18. století, stále nejsme schopni plně ochránit elektrická zařízení před tímto fenoménem. Konkrétně u přenosových soustav, blesk způsobuje více než polovinu poruch vyskytujících se napříč soustavami po celém světě. Jednou z nejvýznamnějších poruch tohoto druhu je tzv. zpětný přeskok. Z důvodu zapříčinění vzniku následných poruch a škod je zpětný přeskok pravděpodobně druhý nejvýznamnější problém, jenž se vyskytuje na elektrizačních soustavách v důsledku úderu blesku, hned po poruše na stínění. Jedná se o jev vyskytující se převážně na přenosových soustavách elektrické energie. Daný úkaz vzniká v důsledku přímého úderu blesku do konstrukce věže, nebo zemnicího lana, po němž nastane přeskok na vodič fáze.

V dnešní době se zemnicí lana běžně používají jako ochrana fázových vodičů před přímým úderem blesku. Avšak úder blesku do těchto lan může zapříčinit onen jev zpětného přeskoku, jenž dokáže způsobit poruchu na vedení. Děje se tak z toho důvodu, že po úderu blesku do zemnicího lana je proud veden k zemi. Je-li odpor země příliš vysoký, napětí na izolátoru se zvýší. Pokud je toto zvýšení napětí na izolátoru až příliš vysoké, může být překročena ochranná hladina izolátoru dané soustavy a dojde k přeskoku napětí ze stožáru, anebo zemnicího lana na fázový vodič a nastane tedy takzvaný zpětný přeskok. Problém nastává, pokud po pomnutí úderu blesku (přibližně 100 μ s) zůstává podél izolátoru ionizovaný vzduch, který poskytuje dokonalou možnost přeskoku běžné hladiny napětí z fáze na zem. Tato situace činí problém, neboť proud z fázového vodiče teče přes ionizovaný izolátor přímo do země, čímž je zaznamenána zemnicí chyba a vzniklý tok může být přerušen až v rozvodně spínacím zařízením. Což způsobí krátkodobý výpadek elektrické energie v síti a tím pozastavení dodávky elektřiny ke spotřebitelům. Pokud by se tak nestalo, vzhledem k velikosti amplitudy a vysoké strmosti přepětí, by mohlo nastat vážné poškození zařízení v rozvodně. Nicméně vznik zpětného přeskoku lze vyřešit zapojením přepětové ochrany, anebo lze jeho výskyt aspoň omezit vhodným návrhem. [16] [17] [18] [19]

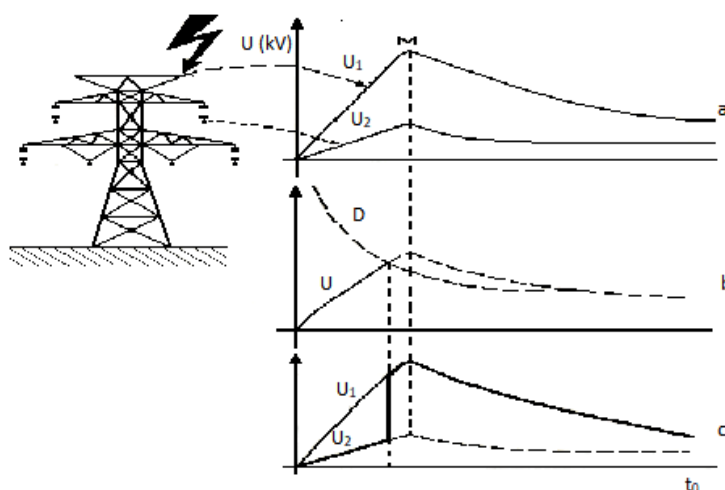


Obr. 16 Znázornění vzniku zpětného přeskoku [29]

4.2 Vznik zpětného přeskoku

Samotný vznik přeskoku ovlivňuje několik okolností, jako je třeba strmost proudového impulsu, parametry stožáru (vzdálenost fázového vodiče od konstrukce věže, indukčnost), zemnicí parametry atd.

Přímý úder blesku do stožáru vedení, způsobí nárůst napětí na jeho konstrukci, jehož tvar U_1 je znázorněn na obr. 17-a. Vzhledem ke kapacitní a induktivní vazbě mezi ochrannými vodiči, strukturou věže a fázovými vodiči je znázorněno i další fázové napětí, které se indukuje na fázový vodič. Toto napětí má stejný průběh jako u U_1 , ale menší amplitudu a bylo pojmenováno U_2 . Napětí přivedené na izolátor vedení se rovná rozdílu U_1 a U_2 , jehož tvar vlny je znázorněn jako U na obr. 17-b, kde můžeme vidět i průběh D , jenž nám znázorňuje izolační pevnost izolátoru. Ve chvíli, kdy se tyto dvě křivky protnou v čase t_1 , nastane překročení izolační pevnosti a vznikne elektrický oblouk od konstrukce stožáru směrem k fázovému vodiči. Poté se napětí U_2 okamžitě zvýší na hodnotu U_1 . Tento vzniklý nárůst napětí na fázovém vodiči v důsledku zpětného přeskoku je znázorněno tučně na obr. 17-c. [18]



Obr. 17 Mechanismus zpětného přeskoku [18]

4.3 Parametry mající vliv na průběh zpětného přeskoku

Nejúčinnějším parametrem míry zpětného přeskoku je vlnová impedance včetně proudové dráhy stožáru a jeho impedance uzemnění. Rychlost vybíjení elektrického náboje se snižuje tím, jak se tato vlnová impedance zvyšuje. V důsledku toho roste amplituda přepětí vytvořená na konstrukci stožáru. Tento nárůst napětí se pohybuje podél konstrukce věže směrem k zemi v místě, kde se stožár připojuje k uzemňovacímu systému. Část přepětí se přenáší do země a zbytek se odráží směrem k vrcholu. Vzhledem k polaritě odraženého napětí se napětí na vrcholu stožáru buď zvyšuje, anebo odečítá.

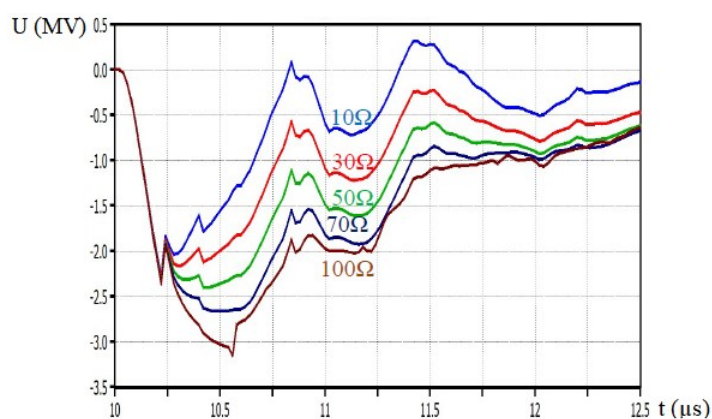
Účinek impedance uzemnění na indukovaném napětí izolátoru lze vidět v Tabulce 3 a na obr. 18. Obecně lze poznamenat, že s rostoucí impedancí, roste i pravděpodobnost výskytu zpětného přeskoku. Zároveň se však zkracuje doba náběhu a zvyšuje se hodnota průběhu přepětí. Nejčastější fázi, na níž nastane zpětný přeskok, je ta, která je umístěná nejvýše na stožáru, a sice z důvodu nejmenší vzdálenosti od vrcholu stožáru. Další z významných parametrů je doba růstu čela blesku,

neboť kratší doba čela, vede k vyššímu přepětí. Viz obr. 19, kde doba čela 1 μs způsobí největší přepětí. Níže uvedené záznamy, jsou ukázky z konkrétní studie, kde fáze A značí nejvýše umístěnou fázi na stožáru, B prostřední a C nejnižší. [19]

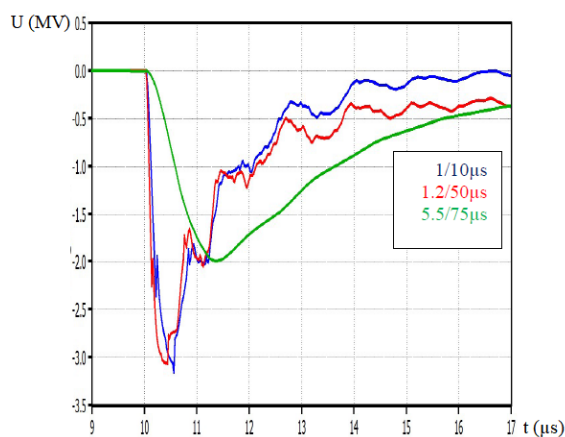
Tabulka 3 - Výskyt zpětného přeskoku [19]

$R_f(\Omega)$	30 kA			50 kA			100 kA		
	Fáze			fáze			fáze		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
5	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-
10	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-
20	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-
30	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-
40	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-
50	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	Y
60	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	Y
70	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	Y
80	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	Y
100	Y		-	Y	Y	-	Y	Y	Y

Y = přeskok nastal, - = přeskok nenastal



Obr. 18 Průběhy se změnou odporu patky [19]



Obr. 19 Průběhy se změnou parametrů proudu [19]

4.4 Parametry působící na vznik zpětného přeskoku

1) Výška stožáru

Obecně se dá říct, že s čím vyšší stožár bude, tím více bude trpět na činnost blesku. Tudiž i schopnost ochrany před zpětným přeskokem je při nárůstu výšky přenosové linky oslabena. Neboť čím je nárůst výšky větší, tím je i větší amplituda míry zpětného přeskoku.

2) Impedance uzemnění

Taktéž impedance uzemnění věže má podstatný vliv na ochranu spojenou se zpětným přeskokem. Protože čím větší impedance patky je, tím větší je i míra zpětného přeskoku. Impedance uzemnění tedy patří mezi důležité vlivy na ochranu věže při zpětném přeskoku. A při návrhu přenosových vedení je zmenšení této impedance jednou z metod, pro zvýšení výdržné úrovně vůči zpětnému přeskoku.

3) Rezistivita půdy

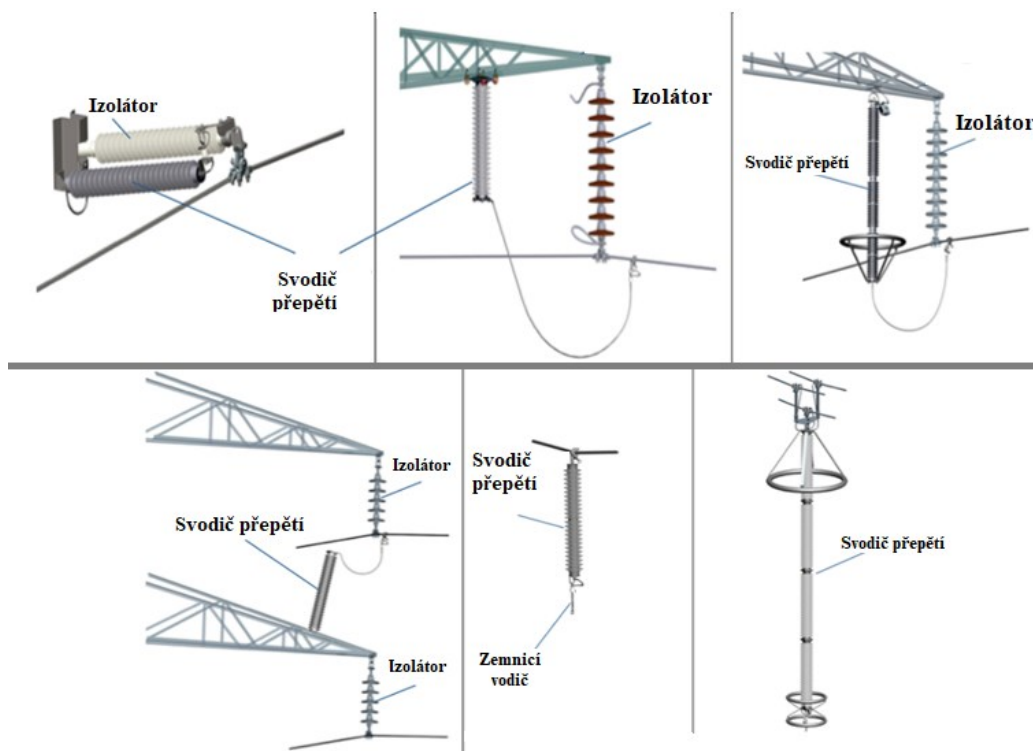
Se zvyšující se rezistivitou půdy, je schopnost ochrany před zpětným přeskokem oslabena. Tudiž míra zpětného přeskoku stoupá. Rezistivita půdy má tedy významný vliv na výkon ochrany věže při zpětném přeskoku, a proto je snížení rezistivity půdy bráno taktéž, jako účinný způsob zlepšení schopnosti ochrany zařízení a zároveň i snížení míry zpětného přeskoku.

4) Počet izolátorů

Při zachování stejné výšky, stejné impedance uzemnění a rezistivity půdy, se při zvyšujícím se počtu izolátorů, roste úroveň ochrany před zpětným přeskokem, a tudíž klesne i míra zpětného přeskoku. Takže zvýšení počtu izolátorů na přenosové lince je dalším účinným způsobem pro zlepšení ochrany v problematice zpětného přeskoku. [20] [25]

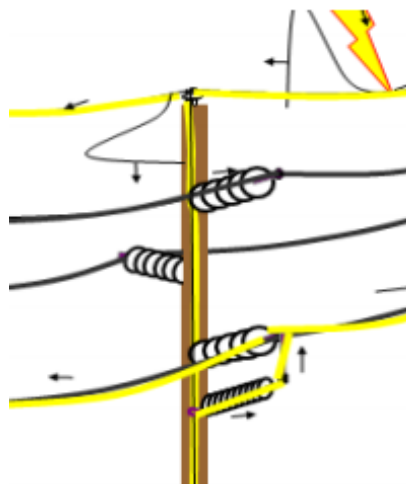
4.5 Ochrana při zpětném přeskoku

Všeobecná instalace svodičů přepětí slouží k omezení nebo odstranění následků zpětných přeskoků na linkách elektrizačních vedení. Užívají se hlavně u vedení se špatnou ochranou pomocí zemnicích lan nebo u vedení s velmi vysokou impedancí uzemnění věže. Pro správnou ochranu před účinky blesku je třeba zapojit svodiče přepětí téměř ke každé věži dané soustavy a někdy i do každé fáze. Ochranné zařízení se připojuje paralelně přímo k izolátoru na stožáru elektrizační soustavy. Tento způsob ochrany je aplikovatelný po celém světě.



Obr. 20 Různé typy svodičů přepětí a jejich zapojení vůči vodiči [27]

Při použití této přepět'ové ochrany je scénář průběhu pro situaci, kdy blesk udeří do nadzemního vedení značně odlišný oproti situaci bez svodiče. Tím nejpodstatnějším rozdílem je fakt, že v případě zásahu blesku do zemnicího lana a následného zvýšení napětí na izolátoru nenastane zpětný přeskok, neboť nevznikne kolem izolátoru zionizované napětí. Neboť vzniklé napětí vůči izolátoru zůstane pod hodnotou přepětí, nenastane překročení jeho dielektrické pevnosti a bleskový proud, jen proteče přes svodič rovnou na fázový vodič. Poté je proud veden do ostatních věží v bezprostřední blízkosti, kde je následně sveden z fáze do země. Z tohoto důvodu se jedná o naprosto odlišný způsob ochrany než u jakékoliv jiné aplikace, neboť vzniklý proud je veden přímo do fázového vodiče, a nikoliv od něj. Velikost vzniklého proudu odpovídá velikosti jen něco málo kolem tisíců ampérů, a tudíž ho lze tedy lehce svést.



Obr. 21 Situace po zpětném přeskoku na vedení po zapojení svodiče přepětí [28]

Výsledkem je skutečnost, že zařízení chrání vedení před zpětnými přeskoky, tak i celou soustavu před zemními chybami bez nutnosti přerušení provozu a rizika potenciálního poškození izolátoru. Což vede k zajištění stabilnější elektrizační soustavy, a tudíž i k spolehlivé dodávce elektrické energie ke spotřebiteli. [16] [17] [21] [28]

Tabulka 4 - Pravděpodobnost zpětného přeskoku při úderu blesku pro vedení 230 kV a zemním odporem 50 Ω za různých podmínek [28]

Způsob ochrany vedení	Pravděpodobnost přeskoku
Bez zemnicích lan i svodičů přepětí	100 %
Svodiče přepětí na horní fázi každého druhého stožáru	88 %
Svodiče přepětí na všech fázích každého druhého stožáru	87 %
Pouze zemnicí lana	21 %
Svodiče přepětí na každé horní fázi každého stožáru	18 %
Svodič přepětí na každé fázi každého stožáru	0,00 %

4.6 Zpětný přeskok u distribučních sítí

Oproti přenosové soustavě existuje jen málo výzkumů o úderu blesku v distribučních sítích vysokého napětí s hodnotou napětí 35 kV nebo nižší. Avšak i v tomto odvětví rostou požadavky na spolehlivost dodávek elektrické energie, tudíž i na ochranu před bleskem. Na rozdíl od přenosových vedení nad 110 kV se distribuční vedení do 35 kV chová neutrálně i bez uzemnění. Proto jednofázová porucha způsobená úderem blesku většinou nevede k vypnutí celého systému. Neboť pravděpodobnost vzniku elektrického oblouku je velmi nízká a samotný systém umožňuje po určitou dobu jednofázový zemnicí zkrat. Ovšem dvojfázová nebo trojfázová chyba určitě způsobí výpadek celé linky. V takových případech je u distribučních sítích složitější odhadnout velikost úderu blesku než u soustav přenosových.

Pro samotné distribuční vedení taktéž existuje spousta faktorů pro ovlivnění zpětného přeskoku, jako je například: impedance uzemnění, rozpětí a výška věže atd. Avšak míra vlivu se liší i podle jednotlivých typů vedení. Jedním z takových typů vedení jsou například Z a II. Pokud u těchto typů porovnáme, například účinek zvýšení impedance uzemnění z 5 Ω na 25 Ω , tak zjistíme, že u typu Z se útlum blesku zvýší jen o jednotky procent. Kdežto u typu II, je tento útlum daleko zřejmější, protože jeho velikost vzroste o více než 50 %. Jako další příklad rozdílných vlastností, lze uvést obvyklou metodu ochrany před bleskem, a tou je počet izolačních jednotek. Nicméně v tomto případě, se rozdíl mezi jednotlivými typy vedení rovná pouze jednotkám procent. [22]

4.7 Metody hodnocení míry zpětného přeskoku

1) Metoda Monte Carlo

Výkon blesku u nadzemního vedení může být znázorněno mírou přeskoku, obvykle vyjádřenou jako počet přeskoků na 100 km za jeden rok. Vzhledem k náhodné povaze blesku se vyžadují kvantitativní analýzy, zaměřené na hodnocení zpětného přeskoku v zásadě na multivariabilním statistickém přístupu, který je ideální pro metodu Monte Carlo, která je velmi běžnou metodou pro tento účel. Postup metody Monte Carlo pro výpočet míry blesku se může skládat z následujících kroků:

-
- generování náhodných čísel k získání parametrů úderu blesku a náhodného charakteru nadzemní linky;
 - aplikace modelu dopadu k určení bodu dopadu každého úderu blesku;
 - výpočet přepětí generované každým úderem v závislosti na místo dopadu;
 - výpočet míry rychlosti přeskoku.

Některé z těchto kroků jsou však obvykle vykonány s neúplnými informacemi, nebo s modely, které mají omezenou přesnost. Například znalost parametrů blesku je obvykle neúplná, nebo model dopadu není dostatečně přesný. Některá omezení lze částečně překonat provedením analýzy citlivosti, která dokáže odhalit ty parametry, pro které jsou vyžadovány přesnější informace a rozsah hodnot. Hlavní nevýhodou každého přístupu založeného na Monte Carlu je fakt, že k dosažení konvergence je zapotřebí velké množství simulací. I z tohoto důvodu se analýzy zpětného přeskoku stávají příliš výpočetně drahé. Proto byly vyvinuty zjednodušené metody, které nejsou založeny na přístupu Monte Carlo, zejména postupy CIGRE a IEEE. Avšak na druhou stranu vzniklo i několik postupů založených právě na přístupu Monte Carlo, ale přijímají se jen velmi jednoduché modely. [23]

2) Metody CIGRE a IEEE

Jedná se dvě významné metody založené na analytických přístupech k odhadu míry výpadku blesku u přenosových vedeních, které navrhly organizace CIGRE a IEEE. Tyto metodiky jsou velmi populární a široce využívané, a to zejména kvůli jejich snadné aplikaci. U výpočtu výkonu blesku na vysokonapěťových přenosových vedení pomocí metodik CIGRE a IEEE se předpokládá analytické formulace, které popisují přechodné chování výsledných přepětí v důsledku přímých úderů blesku do vedení. Na základě těchto přepětí je stanoven kritický proud, který je schopný způsobit zpětný přeskok.

Obě následující metody zvažují pouze výpočet míry zpětného přeskoku spojeného s proudy prvního vráceného úderu. Jsou prezentovány věži přenosové linky a vodiči prostřednictvím přepětíové impedance. Lze zaznamenat i ionizační účinek půdy. Metoda IEEE umožňuje, oproti metodě CIGRE vzít v úvahu i koronový efekt kolem vodičů. Obě metody vypočítávají výsledné přepětí napříč izolátory v důsledku zpětných proudů blesku, jenž jsou znázorněné lineárně rostoucími průběhy. Liší se však předními časovými hodnotami, které jsou doporučeny pro každou metodu jinak. Pro metodu CIGRE se doporučuje použít jako doba čela minimální ekvivalentní čas. Kdežto IEEE doporučuje použít 2 μs , neboť tato hodnota odpovídá střední hodnotě velikosti amplitudy proudu od 50 kA do 200 kA, jenž se pohybuje v rozmezí 1,5 – 2,5 μs .

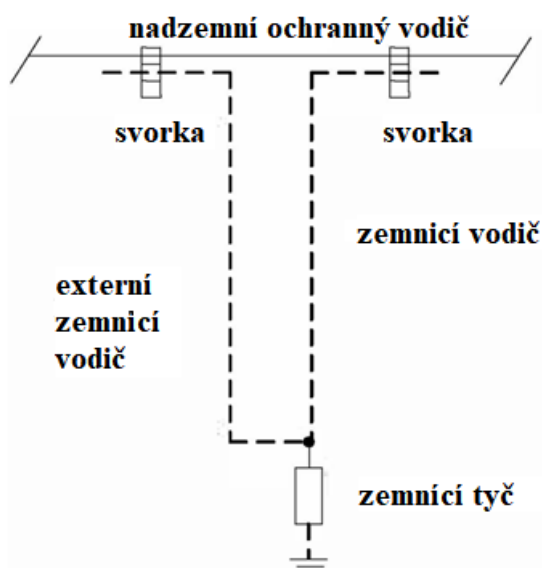
Co se týče samotného výpočtu míry zpětného přeskoku, je založen pouze na přepětí, které je v souvislosti s úderem blesku do vrcholu přenosové věže. Míra zpětného přeskoku je stanovena vynásobením pravděpodobnosti, že proud překročí kritický bod, velikosti úderu blesku, který zasáhl vedení a korekčním faktorem 0,6 (z důvodu posouzení účinku nižších přepětí, vztahujících se k úderu blesku).

Použitím metody CIGRE i IEEE, dostaneme prakticky stejnou špičkovou hodnotu přepětí na izolátoru. Rozdíl mezi získanými hodnotami bývá jen v řádech jednotek procent. Nicméně i přes velmi podobné hodnoty špičkové přepětí získané oběma metodikami, je kritický proud získaný metodou IEEE větší než proud vypočítaný metodikou CIGRE. Jedná se o desítky procent, takový rozdíl souvisí hlavně s odlišnými kritérii metody pro stanovení přesahu izolátoru. [24]

4.8 Ekonomické hodnocení

Následující bod vychází ze skutečné studie thajské společnosti Metropolitan Electricity Authority, která je zodpovědná za distribuci elektrické energie ve střední části Thajska. Jejichž problémem byly opětovné výpadky elektrické energie v důsledku častých úderů blesku do zemnicích vodičů, nebo vrcholů stožárů na jejich distribučních vedeních a následných zpětných přeskoků, které podle jejich statistických údajů v roce 2012 způsobily 17 trvalých přerušení a 44 dočasných (doba přerušení bylo kratší než 1 minuta), což vzhledem k jejich celkové délce vedení činí 9,95 výpadků/100 km za rok.

Základní podstatou této studie je zajistit spolehlivější dodávku elektrické energie ke spotřebitelům. Vzhledem k dané problematice se rozhodli pro metodu řešení pomocí připojení externího zemnicího vodiče, který má za následek snížení míry zpětného přeskoků, jedná se tedy o jeden z efektivních způsobů pro omezení účinků přepětí způsobené zpětným přeskokem. Tento způsob je realizován pomocí připojení pozinkovaného ocelového drátu podél sloupu. Drát má průměr 38,32 mm² a je připojen mezi nadzemním ochranným vodičem a zemnicí tyčí.



Obr. 22 Schéma po instalaci externího zemnicího vodiče [26]

Systém byl simulován v programu ATP-EMTP. Velikost výkonu blesku byla analyzována pomocí bleskového proudu 10/350 μ s za různých podmínek stožáru a pro odlišné velikosti vnitřního odporu zemnicí tyče. Získané poznatky jsou na základě velikosti proudu 34,4 kA, což odpovídá střední hodnotě špičkových proudů zaznamenaných blesků v Thajsku za období let 1993 a 1997.

Výsledky ukazují, že externí uzemnění pomáhá snížit míru zpětného přeskoků, neboť přepětí může být rychleji vedeno k uzemnění. Dále pak bylo zjištěno, že u průběhu blesku 10/350 μ s lze maximální redukce míry zpětného přeskoků dosáhnout pomocí vnitřního odporu zemnicí tyče 5 Ω . Z tohoto důvodu se ekonomická analýza dělala pouze pro tuto hodnotu vnitřního odporu, tzn. porovnání celkových investičních nákladů a celkový nákladů na výpadky dodávek elektrické energie, které činí asi 113 600 Kč/událost. Závěrem studie bylo stanovení, že navrhované řešení dokáže na dané lince přinést výraznou úsporu, a to více než 50 % za životní cyklus. [26]

5 Závěr

Podstatou této bakalářské práce bylo popsat změny, které nám přináší nová verze normy ČSN EN IEC 6007-2 ed. 2 pro koordinaci izolace v sítích vysokého napětí. Dále pak přiblížit čtenářům problematiku spínacího přepětí a zpětného přeskoku, jenž taktéž souvisí s problematikou vysokého napětí u přenosových soustav.

První kapitola vychází čistě z dané normy pro koordinaci izolace. Dozvíme se zde nejaktuálnější normalizované informace o svodičích přepětí, a to jak v oblasti definice, aplikace, konstrukčních typů, tak i schopností řídit tok proudu. Nenásleduje definování trvalého napětí a dočasného přepětí, a to i přesto, že v praxi se očekáváme pozměňování síťového napětí v závislosti na času. Přepětí jsou dále rozdělena podle doby čela a týlu na: přepětí s pomalým, rychlým a velmi rychlým čelem. Společně s definicí samotného průběhu jsou popsány i místa jejich výskytu. U přepětí s velmi rychlým čelem je znázorněn i vývojový diagram sloužící ke koordinaci izolace u tohoto typu přepětí. Další část se zabývá atmosférickou korekcí pro nadmořskou výšku, a to jak pro běžné podmínky v mírném podnebním pásu, tak i pro ostatní, které se nacházejí mimo tuto oblast a lze je zjednodušit tím, že vezmeme v potaz pouze atmosférický tlak v daném místě. Poslední částí této kapitoly jsou způsoby hodnocení nestandardních tvarů bleskového přepětí u GIS, tak i u transformátorů. Daná metoda je znázorněna pomocí vývojového diagramu.

Druhá kapitola se zabývá problematikou spínacího přepětí. Informace k ní byly získány především z článků na serveru IEEE Xplore. Najdeme zde obecné informace o samotném jevu, vlivech parametrů soustavy jako je například vliv impedance zdroje a druh zátěže. Ale i metody sloužící k minimalizaci škod – předřadný rezistor a svodiče přepětí, tak i metodu, která se snaží předejít samotnému vzniku tohoto přepětí – řízené spínání pomocí řídicí jednotky. V dalších částech této kapitoly je popsán jev přechodného spínacího přepětí, se kterým se setkáme při oddalování kontaktů ve vypínačích a sekání proudu ve vakuových vypínačích, jenž nastane při přerušení mimo přirozenou hodnotu nuly, tyto proudy jsou doprovázeny přechodným spínacím přepětím.

Třetí a zároveň poslední kapitola se zabývá zpětným přeskokem, taktéž vychází především z informací z IEEE Xplore, a navíc ještě z ArresterWorks, což je webová stránka pro získání informací v oblasti zvýšení spolehlivosti energetických systémů pomocí svodičů přepětí v důsledku účinků blesku. Ze získaných informací je patrné, že nejefektivnějším způsobem pro ochranu při zpětném přeskoku, je právě svodič přepětí. Další části jsou popsány vlivy, kterými lze předejít anebo alespoň zmenšit pravděpodobnost výskytu zpětného přeskoku. Závěrem je uvedena daná problematika u distribučních sítích, kde se ovšem jedná o méně častý jev, dále pak metody hodnocení a ukázka ekonomické výhodnosti při řešení tohoto problému.

Vypracování této práce, mě obohatilo znalostmi v oblasti zabývané problematiky. Vzhledem k čerpání informací převážně z anglických zdrojů, jsem si rozšířil i znalosti anglických pojmů spjatých s elektroenergetikou. Co se týče dalšího rozvoje této práce, šla by například rozšířit o další informace z odborných článků například na již zmíněném IEEE Xplore, nebo přidáním praktické části v oblasti simulace, například v programu ATP-EMTP, anebo laboratorní úlohy spjaté se spínacím přepětím, či zpětným přeskokem.

Reference

[1] ČSN EN 60071-2. Koordinace izolace - Část 2: Směrnice pro použití. 2 ed. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[2] MARTINEZ-VELASCO, Juan A. a Jacinto MARTIN-ARNEDO. Switching Overvoltages in Power Systems [online]. [cit. 2020-03-21].

Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-39-59-06.pdf>

[3] BENETKA, Tomáš. Ochrana sítí NN, VN, VVN proti přepětí [online] Plzeň, 2013 [cit. 2020-04-14], diplomová práce ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická

Dostupné z: <https://theses.cz/id/ce45xr/>

[4] T. Suwanasri, S. Homklinkaew and C. Suwanasri, "Effects of system configuration on switching overvoltage and insulation strength of high voltage equipment," ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, 2010, pp. 454-458.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5491450>

[5] H. Seyedi, S. Golabi and Z. Abam, "Limitation of transmission line switching overvoltages," 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, 2010, pp. 363-368.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5697610>

[6] S. Yang and G. A. Franklin, "Switching transient overvoltage study simulation comparison using PSCAD/EMTDC and EMTP-RV," 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon, Jacksonville, FL, 2013, pp. 1-5.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6567369>

[7] P. Yang, S. Chen and J. He, "Effect of different arresters on switching overvoltages in UHV transmission lines," in Tsinghua Science and Technology, vol. 15, no. 3, pp. 325-328, June 2010.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6076123>

[8] K. M. C. Dantas, D. Fernandes, L. A. Neves, B. A. Souza and L. C. A. Fonseca, "Mitigation of switching overvoltages in transmission lines via controlled switching," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1-8.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4596806>

[9] M. Rostami and A. A. Razi-Kazemi, "Transient model of the vacuum circuit breaker-probabilistic approach," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, 2017, pp. 1223-1229.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7985228>

[10] E. Lindell, L. Liljestr nd and E. Dullni, "Dependence of the chopping current level of a vacuum interrupter on parallel capacitance," 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Suzhou, 2016, pp. 1-4.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7748701>

[11] G. G. Bongioiolo and L. C. Z. Junior, "Analysis of Transients in Simulations of Vacuum Circuit Breaker Switching," 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2018, pp. 354-360.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8627197>

[12] E. Dullni, E. Lindell and L. Liljestränd, "Dependence of the Chopping Current Level of a Vacuum Interrupter on Parallel Capacitance," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 8, pp. 2150-2156, Aug. 2017.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7917298>

[13] E. P. A. van Lanen, M. Popov, L. van der Sluis and R. P. P. Smeets, "Vacuum circuit breaker current-zero phenomena," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, no. 5, pp. 1589-1593, Oct. 2005.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1518982>

[14] J. Budzisz and P. Pierz, "Transient Current and Voltage Waveforms When Switching on a Capacitive Circuit with a Vacuum Circuit Breaker," 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, 2018, pp. 1-5.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8441090>

[15] *Controlled Switching: Buyers and Application Guide for SwitchSync* [online]. In: . 2012 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://pdf.directindustry.com/pdf/abb-ag/controlled-switching-buyers-application-guide-switchsync/70728-418433-_7.html

Dostupné z: https://pdf.directindustry.com/pdf/abb-ag/controlled-switching-buyers-application-guide-switchsync/70728-418433-_7.html

[16] WOODWORTH, Jonthan. Understanding Backflash on a Transmission Line. *Linked in* [online]. 2017 [cit. 2020-04-7].

Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/understanding-backflash-transmission-line-jonathan-woodworth?articleId=6229425360140845056#comments-6229425360140845056&trk=public_profile_article_view

[17] ABB's PEXLINK line surge arrester concept - Enabling reliable power grids [online]. 2015 [cit. 2020-04-14].

Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=cNjUckDvfug>

[18] S. Talaei Mobarakei, T. Sami and B. Porkar, "Back Flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination," 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 170-174.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6221567>

[19] D. Stanchev, "Model study of lightning overvoltages in substation due to back flashover of overhead transmission line 220 kv," 2018 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BULEF), Sozopol, Bulgaria, 2018, pp. 1-4.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8646928>

[20] S. Wu and W. Sun, "Back Flashover Protection Performance Analysis of 220kV Double Circuit Transmission Line," 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, 2011, pp. 1-4.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5749070>

[21] A. H. Abu Bakar, H. Mokhlis, S. Abd Halim, S. S. Mat Isa and H. A. Illias, "Analysis of Arrester Energy for 132vK Overhead Transmission Line Due to Back Flashover and Shielding Failure," 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, 2012, pp. 1-6.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6307344>

[22] Li Zhina, "The Simulation and Analysis of the Lightning Back-flashover Protection Performance of the Medium Voltage Distribution Network," 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, 2008, pp. 296-300.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4773932>

[23] F. M. Gatta, A. Geri, S. Lauria and M. Maccioni, "Monte Carlo evaluation of the impact of subsequent strokes on backflashover rate," 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, 2015, pp. 1210-1215.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7165341>

[24] F. H. Silveira, S. Visacro and R. E. de Souza Filho, "Calculation of backflashover outage rate of transmission lines: A discussion on traditional methodologies and recent advances," 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneario Camboriu, 2015, pp. 226-230.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7339303>

[25] D. Xu and Z. Hao, "Research of the lightning protection performance for 220 kV double-circuit transmission line," 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, 2011, pp. 314-317.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6110133>

[26] A. Phayomhom, S. Sirisumrannukul, T. Kasirawat and A. Puttarach, "Economic assessment of lightning performance improvement of 69 kV subtransmission line in MEA's power distribution system," 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chonburi, 2014, pp. 1-4.

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6925846>

[27] Advantages of Line Surge Arresters. In: *INMR* [online]. 2016 [cit. 2020-05-01].

Dostupné z: <https://www.inmr.com/advantages-line-surge-arresters/>

[28] WOODWORTH, Jonathan. What is a Transmission Line Arrester. In: *ArresterWorks* [online]. 2009 [cit. 2020-04-13].

Dostupné z: http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/transmission_line_arrester.pdf

[29] Line back flashover rate [online]. In: . [cit. 2020-04].

Dostupné z: <https://image.slidesharecdn.com/sadoviclightingperformancecomputation-090519093726-phpapp01/95/sadovic-lighting-performance-computation-3-728.jpg?cb=1242725937>